

METODOLOGÍAS GENÉRICAS APLICABLES AL DISEÑO ROBUSTO EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS Y/O AUTOMÁTICOS, CON EL FIN DE OPTIMIZAR EL  
CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO

DANIELA MEJÍA MONTOYA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2018

METODOLOGÍAS GENÉRICAS APLICABLES AL DISEÑO ROBUSTO EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS Y/O AUTOMÁTICOS, CON EL FIN DE OPTIMIZAR EL  
CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO

DANIELA MEJÍA MONTTOYA

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniera electricista

Director

Phd. Mauricio Holguín Londoño

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2018

## NOTA DE ACEPTACION

---

---

---

---

---

---

---

Director  
Ingeniero electricista Ph.D (c)  
Mauricio Holguín Londoño

---

Director del programa de ingeniería  
eléctrica.  
Ingeniero eléctrico  
José Germán Quintero

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres Gloria Janeth Mejía y Jairo Gutiérrez por inculcarme principios y valores para ser una mujer correcta cada día, por infundirme la idea de la importancia de la educación, por el esfuerzo, el apoyo y las palabras de aliento que me brindan cada día.

A toda mi familia, en especial a mi abuela quien es un pilar en mi vida.

A mis compañeros y amigos, que estuvieron ahí para apoyarme y animarme, gracias por hacer parte de este proceso y enseñarme que las cosas son más fáciles si se aprenden a disfrutar en compañía.

A mi director de tesis Mauricio Holguín Londoño, gracias por su entereza, sencillez y la sonrisa que lo caracteriza, por el apoyo y la paciencia que me brindó durante todo este tiempo y el interés que mostró siempre por el buen desarrollo de esta tesis.

Gracias infinitas a todas las personas que estuvieron durante todo mi proceso de aprendizaje y que hicieron posible obtener este logro.

## Tabla de contenido

Contenido	
Agradecimientos.....	iv
Tabla de contenido.....	v
Listas de tablas .....	vii
Lista de figuras .....	viii
Glosario .....	ix
Parte I. Introducción .....	1
<b>1    Capítulo. Planteamiento del problema</b> .....	1
<b>2    Capítulo. Justificación</b> .....	2
<b>3    Capítulo. Objetivos</b> .....	3
3.1    Objetivo general.....	3
3.2    Objetivos específicos.....	3
Parte II. Marco teórico .....	4
<b>4    Capítulo. Gestión de activos y ciclo de vida</b> .....	4
4.1    Ciclo de vida. ....	4
4.2    Gestión de activos. ....	7
4.3    PAS55 y la gestión de activos.....	9
4.4    EN 13306:3011. ....	11
<b>5    Capítulo. Mantenimiento</b> .....	12
5.1    Mantenimiento correctivo.....	12
5.2    Mantenimiento preventivo.....	13
5.3    Mantenimiento predictivo.....	14
5.4    Mantenimiento productivo total.....	14
<b>6    Capítulo. Confiabilidad</b> .....	15
6.1    Funciones de probabilidad.....	15
6.2    Análisis de la confiabilidad. ....	19
6.3    Diagrama de bloques de confiabilidad. ....	21
Parte III. Análisis, resultados y conclusiones.....	24
<b>7    Capítulo. Métodos para analizar la confiabilidad</b> .....	24

7.1	Análisis de árbol de falla. ....	25
7.2	Análisis del modo de fallo y efectos FMEA.....	32
7.3	Análisis de relevancia e importancia.....	34
7.4	Diseño robusto. ....	35
<b>8</b>	<b>Capítulo. Mejorar la confiabilidad</b> .....	<b>39</b>
8.1	Ejemplo de cómo mejorar la confiabilidad.....	41
8.2	Conclusiones .....	46
	Bibliografía.....	47

**Listas de tablas**

Tabla 1 Símbolos utilizados en la construcción del FTA .....	29
Tabla 2. Contraste entre diagrama de bloques universal y árboles de fallos .....	30
Tabla 3. Magnitudes para el suceso TOP .....	32
Tabla 4 Análisis de riesgos.....	43

## Lista de figuras

Figura 1. Ciclo de vida.....	4
Figura 2 Gestión de activos. ....	9
Figura 3 Curva de bañera de tasa de fallos .....	17
Figura 4 Función de Weibull.....	19
Figura 5 Sistema serie.....	21
Figura 6 Sistema paralelo.....	22
Figura 7 Sistema serie de paralelos .....	22
Figura 8 Sistema paralelo de series .....	22
Figura 9 Sistema en standby.....	23
Figura 10 Sistema irreducible.....	23
Figura 11 Símbolos lógicos básicos de un árbol de fallas. ....	25
Figura 12 Esquema general de árbol de fallos .....	26
Figura 13 Árbol de fallos .....	27
Figura 14 Tipos de análisis del modo de fallo y efectos.....	34
Figura 15 Función de pérdida de la calidad .....	39
Figura 16 Confiabilidad operacional .....	40
Figura 17 Esquema de accionamiento de turbina de aspiración.....	42
Figura 18 Matriz de criticidad. ....	42
Figura 19 Árbol de fallo (falla en el embrague centrífugo) .....	44
Figura 20 Árbol de falla (Desgaste tolva).....	44
Figura 21 Disponibilidad.....	45
Figura 22 Tiempo medio entre fallas.....	45



## Glosario

BPM	Business Process Management
CDF	Cumulative Distribution Function
CFR	Índice de Riesgo Constante
DFR	Disminución de la Tasa de Riesgo
DV	Verificación del Diseño
EAM	Enterprise Asset Management
FMEA	Failure Mode Effect Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
IFR	Aumento de la Tasa de Riesgo
ITAM	Administración de Proyectos de Tecnologías de Información
KPI	Key Performance Indicator
LCC	Life Cycle Costing
MTBF	Tiempo Medio entre Fallas
MTTF	Tiempo Medio de Falla
PDF	Probability Density Function
PV	Validación del Proceso
TLAM	Total Life Cycle Asset Management
TPM	Mantenimiento Productivo Total

## **Parte I. Introducción**

### **1 Capítulo. Planteamiento del problema**

Actualmente se presentan productos que tienden a fallar, trayendo consigo consecuencias que afectan los indicadores económicos para el sector industrial y comercial. Existen diferentes factores que pueden aumentar el índice de fallo en los productos, entre ellos se puede mencionar el diseño inadecuado, o que no se tengan todos los estudios pertinentes para aplicar dicho proyecto.

Un producto puede fallar simplemente por el constante uso que causa su desgaste, así mismo una falla puede ser producto de no conocer las propiedades de los materiales que se van a utilizar, desconocer los parámetros básicos como la masa, las dimensiones, los coeficientes de fricción, las resistencias y las tensiones, que son parámetros no absolutos, si no que en la práctica están sujetos a variaciones. Dichas variaciones se presentan como consecuencia de los procesos de fabricación y por el mismo uso de los productos, llevando a poner en riesgo la confiabilidad. Algunos factores que intervienen en estas variaciones son la participación humana, la variabilidad de los procesos y el azar, los cuales se deben identificar, analizar, corregir y/o mejorar con el fin de lograr productos más competitivos (Guangbin, 2007)

En el mundo consumista, donde los comerciantes viven en una continua competencia en el mercado es necesario que los fabricantes acudan a diferentes prácticas que cumplan con todas las expectativas del cliente, minimizando costos y aumentando la confiabilidad en los productos. La confiabilidad va ligada al tiempo de planificación del producto, es decir, se deben tener en cuenta la funcionalidad, el costo y otros factores que garanticen las expectativas del cliente, teniendo en cuenta los diferentes parámetros a la hora de examinar si un producto tiene éxito en el mercado.

Sin embargo, la competencia, los plazos, el costo de los fallos, la rápida evolución de los nuevos materiales, los sistemas complejos, la necesidad de reducir los costos de despliegue y las consideraciones de seguridad aumentan los riesgos del desarrollo del producto (O'Connor, 2015). Por ende, es importante tener en cuenta la capacidad de entender y anticipar las posibles causas de los fracasos y saber cómo prevenirlos a la hora de hacer diseños y analizar datos.

Cuando hablamos de confiabilidad, esta se refiere al funcionamiento adecuado de los equipos, es decir, la probabilidad de que un equipo o un sistema cumpla con la función requerida bajo las condiciones de uso. El nivel de confiabilidad requerido por un sistema eléctrico se debe establecer de acuerdo con estándares, contemplando las necesidades del cliente en cuanto a disponibilidad, seguridad, mantenimiento y confiabilidad.

La confiabilidad en sistemas eléctricos va ligada a la aptitud de mantener la continuidad del servicio en caso de que exista una falla en alguno de los componentes que lo conforman, esto depende de la fiabilidad de los equipos instalados en él y en el tiempo de reparación en caso de falla.

En los sistemas eléctricos ya sean de potencia, control o distribución, la confiabilidad está relacionada con la continuidad en el servicio pero no es posible ofrecer una continuidad en el servicio en un ciento por ciento bajo las condiciones de operación, debido a las fallas aleatorias internas y externas puesto que afectan todos o algunas de sus componentes, las limitaciones de tipo económicos también impiden mejorar la calidad de estos, por lo tanto se deben tolerar las fallas siempre y cuando estas no sean frecuentes y prolongadas (Zapata, 2011).

Bajo estas circunstancias, en este proyecto de grado se desea dar respuesta a la pregunta: ¿Es posible planear desde la misma concepción y diseño de un sistema eléctrico y/o automático su desempeño a nivel de confiabilidad con miras a mejorar competitividad?

## **2 Capítulo. Justificación**

Es de suma importancia satisfacer a los clientes, evaluando las necesidades de este para asegurar la competitividad de los productos en el medio, a través de artículos de buena calidad y a los mejores precios. Por ende, se debe determinar la manera de hacer frente a las fallas, anticiparlas, predecirlas y analizarlas para obtener así productos competitivos que cumplan con los parámetros y criterios establecidos.

Es común que todos los elementos que componen un sistema eléctrico cobran importancia a la hora de un estudio de confiabilidad, pero no todos los elementos constitutivos de un sistema tienen el mismo efecto sobre el comportamiento de un fallo, es aquí donde es fundamental el análisis de importancia de cada elemento (Zapata, 2011). La importancia de un componente tiene dos aspectos, uno estructural y otro probabilístico, por su parte el aspecto estructural hace referencia a la ubicación estratégica de un elemento dentro del sistema y el segundo aspecto hace referencia a la probabilidad de que este funcione, por ende, es importante evaluar cada uno de los elementos que compone el sistema y determinar la influencia de este en el funcionamiento (O'Connor, 2015).

Otro aspecto crítico que se debe tener presente en el diseño de un sistema es el FMEA (Efectos, y Modos de Falla), siendo este un procedimiento para la identificación y corrección de posibles deficiencias de diseño a través de análisis de modos de falla, efectos y mecanismos (Guangbin, 2007). Este análisis es capaz de reconocer y evaluar si es posible, o no, que un producto entre en falla, sus consecuencias y formas de mitigación. Los resultados de un FMEA son fundamentales en el desarrollo de la planificación y diseño de determinados sistemas. El FMEA se puede clasificar en tres categorías: FMEA del sistema, FMEA de

diseño y FMEA del proceso; al hacer buen uso de este análisis se puede afirmar que se aumenta la confiabilidad de los sistemas y se reducen costos de mantenimiento (O'Connor, 2015). En contraste con el análisis de FMEA, el análisis de árbol de fallas (FTA) es una representación gráfica de relaciones lógicas entre eventos de fallo donde el evento superior se ramifica en eventos que contribuyen a través de análisis y causa y efecto, es común realizar una combinación del FTA y el FMEA para mejorar la identificación de una falla (Guangbin, 2007).

Debida a la preocupación constante de mejorar la calidad y la confiabilidad se han buscado técnicas y métodos para lograrlo, una de estas técnicas fue desarrollada por la ingeniería de calidad y se denomina, diseño robusto. Se puede definir la robustez como la capacidad de un producto para realizar su función en presencia de factores de ruido. El diseño robusto tiene tres etapas tales como: diseño del sistema, diseño de parámetros y diseño de tolerancia (Guangbin, 2007), este método es utilizado en la mayoría de las industrias, el diseño robusto es una metodología para predecir y prevenir problemas de calidad desde las etapas tempranas del producto incluyendo factores que pueden afectar (Rodríguez, 2012). Finalmente, el estudiar el diseño robusto cobra importancia, puesto que este es una herramienta que implica diseñar un producto que sobrepase las expectativas del cliente en las características más importantes, minimizando la posibilidad de errores. Un diseño robusto aumenta la confiabilidad y optimiza las condiciones del producto para que este sea menos sensible a las diferentes variaciones.

Por tanto, con este proyecto de grado se busca establecer un conjunto de metodologías genéricas aplicables al diseño robusto en sistemas eléctricos y/o automáticos, con el fin de incrementar la confiabilidad, disminuir el impacto de posibles fallos y optimizar su operación.

### **3 Capítulo. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general.**

Metodologías genéricas aplicables al diseño robusto en sistemas eléctricos y/o automáticos, con el fin de mejorar el ciclo de vida de un activo, en cuanto a factores como la confiabilidad, impacto de posibles fallos y optimización de la operación.

#### **3.2 Objetivos específicos.**

- Introducir el concepto de ciclo de vida de un activo y los aspectos generales en cuanto a planeación y diseño.
- Indagar las teorías generales relevantes en cuanto a los diferentes métodos que pueden mejorar la confiabilidad, aplicando métodos como: diseño robusto, FMEA, FTA.
- Establecer la metodología apropiada para mejorar la confiabilidad
- Aplicar la metodología correcta sujetas a un ejemplo de aplicación

## Parte II. Marco teórico

### 4 Capítulo. Gestión de activos y ciclo de vida

#### 4.1 Ciclo de vida.

Existen diferentes definiciones asociadas al ciclo de vida de un producto, en general, el ciclo de vida se puede definir como “una serie de etapas que un producto pasa desde su concepción a su disposición”, así como la práctica de gestión de activos del ciclo de vida (TLAM por las siglas en inglés *Total Life-cycle Asset Management*) adopta una visión ampliada de cómo se planifican, utilizan mantienen y se eliminan los activos (Guangbin, 2007).

Por lo general, la empresa convencional ignora u omite las fases clave dentro del ciclo de vida del activo, no tienen en cuenta una visión más compacta de todo el ciclo de vida. Hoy en día se ha incrementado la importancia del ciclo de vida de un producto, puesto que se enfoca estratégicamente en procesar eficientemente la información que pueda influir dentro del marco de éste, dicho aspecto se logra gracias a las nuevas tecnologías emergentes permitiendo que la información sea controlable y visible, ya que el ciclo de vida puede tener efecto directo con la supervivencia de un producto.

A continuación, en la Figura 1. Ciclo de vida 1, se puede observar el marco del TLAM, este desglosa el ciclo de vida de los activos en fases discretizadas. Figura 1. Ciclo de vida



Figura 1. Ciclo de vida

- Estrategia de activos: En esta fase se establece una estrategia óptima que cumpla con los estándares y requisitos comerciales de la empresa. Las actividades que se incluyen en esta fase pueden incluir la evaluación de prácticas de gestión de activos, desarrollo de una estrategia integral de gestión de activos y el desarrollo de un programa de medición de indicadores clave de rendimientos (KPI) (Cañaverl Vargas & Heredia, 2017) siendo estas las métricas que se utilizan para cuantificar los resultados de una determinada acción o estrategia en función de unos objetivos predeterminados.
- Planificación: En esta fase se definen claramente los objetivos de los activos, los estándares, las políticas y los procedimientos centrados en la entrega de la estrategia de gestión de activos (Cañaverl Vargas & Heredia, 2017).

El objetivo principal es identificar las necesidades del cliente, la empresa debe reconocer y analizar las necesidades del negocio y el estado de la competencia en el mercado, innovando y presentando propuestas de productos (Guangbin, 2007). Las empresas pueden desear desarrollar políticas y estándares realizando la planificación de gestión de activos de cartera, esto le permite planear en toda la cartera de activos (Cañaveral Vargas & Heredia, 2017).

- **Diseño y desarrollo:** Esta fase, inicia con la preparación de especificaciones detalladas del producto sobre la confiabilidad, características, funcionalidades, economía, ergonomía y legalidad. Todas las especificaciones deben cumplir con los requisitos definidos en la fase de planificación del producto, asegurando que el producto cumpla con todas las expectativas del cliente y garantizando toda reglamentación que avale una posición competitiva y correcta en el mercado.

El siguiente paso es llevar a cabo el diseño desde la concepción, el punto de partida para desarrollar un concepto es el diseño estructurado, este determina el flujo de información y las iteraciones físicas.

Las funciones de los subsistemas elaborados a través de diagramas de bloques se deben definir claramente en esta fase, estos son de gran ayuda (Perez Gelvez & Carrasquilla Franco, 2013).

Después de la etapa de diseño de concepción, sigue la etapa de diseño detallado, inicial con el desarrollo de especificaciones de diseño que aseguran que se satisfacen los requisitos de todo el sistema. Luego, se analizan los detalles físicos que se diseñan con determinadas características para cumplir con las funciones de cada subsistema dentro de toda la estructura del producto.

Estos detalles pueden incluir, conexiones eléctricas, valores nominales y tolerancia de los parámetros funciones. Los materiales y componentes también se seleccionan en esta etapa, es importante señalar que el diseño y el desarrollo es esencialmente una tarea iterativa como resultado de la revisión y análisis del diseño, pero al implementar programas eficaces de confiabilidad reduce la repetición (Guangbin, 2007).

- **Crear:** Esta fase implica el acto de crear, construir u obtener los activos planeados, aquí es donde se puede tener uno de los impactos más visibles puesto que es donde se realiza la primera inversión significativa en la administración de activos.
- **Funcionar:** En esta fase se operan los activos según la estrategia, usando los estándares, políticas y procedimientos basados en el TLAM. Consta de dos pasos principales, la verificación del diseño DV y la validación del proceso PV; después de que la etapa de

diseño ha sido completada con éxito, existen diferentes factores que se construyen para la prueba DV garantizando que el diseño cumple con los requisitos funcionales, ambientales, de confiabilidad, reglamentarios y otros aspectos que se estipulan en las especificaciones del producto. Antes de la prueba DV, se debe desarrollar un plan de prueba que especifique las condiciones de prueba, el tamaño de la muestra, los criterios de aceptación, los procedimientos de operación de prueba y otros elementos. Las condiciones de prueba deben reflejar el uso real que el producto tenga cuando se despliegue en el campo, una prueba de DV debe ser lo suficientemente grande como para que la evidencia para confirmar que la etapa de diseño ha sido superada y es estadísticamente válida, si por algún motivo existe inconformidad o falla, se deben identificar las causas para realizar cambios en el diseño. El rediseño debe someterse a pruebas DV hasta que todos los criterios de validación se hayan cumplido completamente. El siguiente paso es la evaluación PV, quien evalúa la capacidad de producción del proceso, el proceso no debe degradar la confiabilidad.

Las nuevas prácticas en esta área incluyen la gestión formal de activos de ITAM (Administración de Proyectos de Tecnologías de Información).

- **Mantener:** Después de que el diseño es verificado y todo el proceso es validado, la producción puede comenzar. En esta fase pueden incluir una serie de actividades interrelacionadas, como el manejo de materiales, producción de piezas, ensamble y control y administración de calidad, por último, los productos deben estar sujetos a pruebas finales y luego enviados a los clientes.

El objetivo de esta fase es mantener los activos en apoyo de la estrategia y los objetivos utilizando los estándares, las políticas y los procedimientos implementados con retroalimentación en el TLAM. Es importante tener en cuenta que los costos y los recursos de mantenimiento pueden alterar enormemente el costo total de propiedad, desde los costos de reparación hasta el tiempo de inactividad. El mantenimiento predictivo se convierte en un pilar principal, basado en la comprensión de datos pasados a través de las bases de datos de fallas y otras herramientas de seguimiento; el mantenimiento productivo total (TPM) es una metodología implementada para administrar el mantenimiento y mejorar el tiempo de actividad y la confiabilidad de los activos críticos.

- **Modificar:** Se recurre a esta fase cuando los activos lo requieran, se debe asegurar que las modificaciones sobresalgan y se vean reflejadas, por ejemplo, en la estrategia, las políticas y los procedimientos. Otras prácticas incluyen el costo total del ciclo de vida y el análisis de mejora del rendimiento, esta fase tiende a ser una parte crítica para la extensión de la vida de los activos, a cuanto las máquinas se rediseñan, las instalaciones y se adaptan para facilitar procesos nuevos.

Otras prácticas incluyen el costo total del ciclo de vida y el análisis de mejora del rendimiento. La modificación también puede ser crítica para la extensión de la vida de los activos, a medida que las máquinas se rediseñan, las instalaciones se readaptan y la tecnología se adapta para facilitar los procesos más nuevos (Cañaveral Vargas & Heredia, 2017).

- Disponer: En esta fase se incluye la eliminación, el retiro o la liquidación tocata de los activos de acuerdo con las políticas que rigen la empresa con el debido procedimiento, esta fase implica la terminación del producto, este se puede traducir a un producto desechado o reciclado, se presenta cuando no puede continuar el servicio o éste ya no es rentable. Esta fase puede tener implicaciones financieras significantes (Guangbin, 2007).

#### **4.2 Gestión de activos.**

Actualmente, las empresas han presentado una tendencia emergente impulsada por una nueva regulación enfocada en prácticas y operaciones “verdes”, tales como, gestión sostenible de instalaciones, eliminación adecuada de activos, reducción de la huella de carbono en las plantas de fabricación y reducción de emisiones de carbono, estas prácticas que hoy en día se están convirtiendo en requisitos a considerar. Esta fase sólo es el comienzo de una tendencia puesto que las prácticas ecológicas deben pasar por todas las etapas del ciclo de vida (Cañaveral Vargas & Heredia, 2017). Cada vez son más las empresas internacionales líderes en el sector eléctrico que para responder a las normatividades locales en calidad de energía, han implementado el modelo LCC (Life Cycle Costing) como estrategia para la renovación de activos, (CIGRÉ. Working Group B5.08, 2011).

Algunos de las ventajas que tiene implementar el modelo LCC son:

- Requiere un estudio detallado y riguroso sobre cada una de las partes que afectan los costos en las diferentes etapas del ciclo de vida.
- Tiene diferentes estructuras que permiten un análisis profundo y detallado.
- Se tienen en cuenta diferentes indicadores financieros que arrojan resultados sobre la viabilidad de la inversión con costos proyectos y análisis económico.
- A través de esto se pueden eliminar costos antes de incurrir en ellos y manejar algunos riesgos cruciales relacionados con los costos, flujo de caja y rentabilidad

La norma IEC 60300 (IEC, 2004) sugiere hacer una evaluación de costos detallada de las diferentes variables que afectan el activo durante el ciclo de vida, mediante el empleo de tres métodos:

*Costo de ingeniería:* Esta es una metodología en la cual, a partir del estudio de métodos y tiempos, se pueden determinar los costos asociados a cada una de las actividades del sistema.  
*Analogía:* se trata de una estimación, mediante el uso de resultados históricos de productos similares o componentes.



*Paramétrico:* basado en relaciones matemáticas entre costos y algunos parámetros relacionados de productos y procesos.

Los diferentes costos en los que se incurre durante el proceso de instalación, operación y eliminación del equipo hacen parte del costo total que va a permitir calcular los indicadores financieros para dictaminar la vida económica del activo (Perez Gelvez & Carrasquilla Franco, 2013).

La norma IEC\_60300-3 define el ciclo de vida de los activos como “...el intervalo de tiempo entre la concepción del producto y su eliminación” (IEC, 2004)

En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra el marco general del TLAM, desglosando el ciclo de vida de los activos e incluyendo la gestión financiera y atributos de tecnología como apoyos a considerar.

Cada una de las fases mencionadas anteriormente, tienen implicaciones de gestión financiera y se deben regir bajo requisitos de planificación, por lo general se pueden observar mejor durante las fases de creación y adquisición y eliminación, pero también son muy importantes en las fases de operación y mantenimientos, donde el rendimiento financiero se ve afectado (Cañaveral Vargas & Heredia, 2017).

**Gestión financiera:** En esta etapa se ve reflejada el hecho de administrar y reportar los costos, las fuentes de financiación, disponibilidad de fondos, presupuestos y el retorno de la inversión para los activos, esta etapa incluye todas las fases del ciclo de vida de los activos, permite asegurar el cumplimiento de los objetivos y estrategias planteadas. Desde la perspectiva de un fabricante, es enfocada en la obtención de una ventaja competitiva y la reducción de costos y tiempo en cuanto a la realización del producto.

**Tecnología:** En este caso, nos referimos a la tecnología como una herramienta de gestión de activos, no como el activo en sí (aunque el sistema de gestión de activos es realmente un activo). La tecnología puede transformar cómo se planifica y ejecuta cada una de estas fases. En un sistema EAM (*Enterprise Asset Management*), los modelos para planificación y administración residen dentro de un sistema común y centralizado. También se realiza un seguimiento de la catalogación activa, el monitoreo y la medición de los activos, a menudo en tiempo real, para ayudar en las acciones de reparación, para permitir decisiones rápidas de adquisición y reemplazo, y para monitorear el desempeño. La tecnología también se usa para integrar el EAM con otros sistemas clave, como los paneles de contabilidad, adquisiciones y administración del desempeño empresarial o por sus siglas en inglés BPM (*Business Process Management*).

Operacionalmente, este marco debe ser formalizado y programático dentro de la organización. Esto significa aplicar un enfoque TLAM a los sistemas de gestión de activos, integrando el enfoque en los esfuerzos de planificación y estrategia, y utilizando el marco para establecer el monitoreo y las métricas para medir el éxito y el rendimiento.



*Figura 2 Gestión de activos.*

### **4.3 PAS55 y la gestión de activos.**

La PAS 55, cubre todos los elementos de la gestión de activos en las diferentes etapas del ciclo de vida, desde la ingeniería, operación, mantenimiento y desincorporación de los activos. Esta norma también contiene requerimientos claros en términos de gestión de riesgos, ciclos de vida, costos y desempeño de una manera óptima.

La PAS55 define a la gestión de activos como “las actividades y prácticas sistemáticas y controladas a través de las cuales una organización gestiona óptimamente sus activos, su desempeño asociado, sus riesgos y gastos a través de su ciclo de vida, con el objetivo de cumplir con el plan estratégico de la organización” (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2012).

Cómo ya se mencionó, el ciclo de vida abarca desde la concepción de un activo hasta las renovaciones de este, pasando por el diseño, construcción, puesta en servicio, operación, mantenimiento y mejoramiento. Esta norma afirma que la optimización es un factor importante en la gestión de activos, es decir mejorar la relación de costos, riesgos y beneficios del sistema en la gestión del mantenimiento (Zapata, 2011).

La norma PAS 55 se aplica a organizaciones que tengan una alta dependencia en infraestructura o equipos físicos. Esta metodología asegura que la planificación total del ciclo de vida, la gestión del riesgo y la sustentabilidad del negocio se implementen en los proyectos de inversiones, operaciones y mantenimiento de activos (O’Connor, 2015).

Las organizaciones que han empezado a vincular la propuesta de estándar PAS 55 han reportado mejoras significativas en cuestiones de costos y desempeño/servicio. PAS 55

proporciona clara evidencia de una adecuada gestión de activos a los clientes, inversores, reguladores y otras partes interesadas (Rayo Peinado, 2011).

Contar con un sistema adecuado a las necesidades de la organización en términos de tamaño, tiempo de vida y riesgos asociados a los activos de la misma, es un tema relevante en el mercado general a nivel mundial, por su parte la norma PAS 55 tiene como objetivo identificar los elementos que tienen relevancia con la gestión de activos, auditoría del sistema de gestión, identificación de brechas respecto al desarrollo de la norma, desarrollo de plan de trabajo, posible acreditación o certificación del sistema de gestión (Bernardo Durán, 2008) .

#### ***4.3.1 Características de PAS 55 benefician el buen desarrollo del mantenimiento.***

En su documento *gestión de activos bajo estándares internacionales*, (Bernardo Durán, 2008), explica una serie de características que benefician directamente el buen desarrollo del mantenimiento.

- La PAS55 es aplicable a todo sector de servicios dependiente de activos físicos.
- La gestión de activos no es prescriptiva, no recomienda ninguna práctica ni tecnología específica.
- La gestión de activos no es un tema enfocado solo en el mantenimiento, operación e ingeniería, se trata de una disciplina que integra estos tres pilares principales bajo una misma visión.
- La gestión de activos considera de manera óptima los costos, el riesgo y el desempeño del producto.
- Se debe considerar el ciclo de vida total partiendo desde la planificación de los activos hasta su innovación, pasando todas las etapas.

#### ***4.3.2 Beneficios de la PAS 55.***

La mayoría de las empresas que han implementado la norma PAS 55 reconocen que una buena práctica de gestión de activos es un elemento fundamental para el éxito de su negocio y la han adoptado como un hilo conductor en el camino hacia la optimización.

La implementación de la PAS 55, establece que existe un gran potencial de mejora en resultados financieros y de operación de las empresas a través de la optimización y aplicación de las mejores prácticas en la gestión de activos industriales (Rayo Peinado, 2011).

Elementos de una buena gestión según la PAS 55:

- *Holístico:* El sistema debe ser multi-disciplinario.
- *Sistemático:* Se debe aplicar rigurosamente en un sistema de gestión estructurado.
- *Sistémico:* Se tiene en cuenta todos los elementos que componen el activo independientemente si ganan o restan.
- *Basado en riesgo:* Se evalúa el riesgo en todas las fases.

- *Óptimo*: Tener métodos claros que se van a implementar.
- *Sustentable*: La gestión de activos debe tener en cuenta todas las fases de este.
- *Integrado*: Se deben integrar todos los aspectos definitivos.

La implementación de la PAS55 tiene múltiples beneficios para las empresas, no solo desde el punto de vista regulatorio si no también económicamente hablando, puesto el buen uso y manejo de esta puede reducir los costos de mantenimiento y la calidad del servicio.

El autor Bernardo Durán, afirma que la norma PAS 55 puede beneficiar a las empresas, no sólo desde el punto de vista regulatorio si no eficazmente sus activos, generando ahorros de costes y mejoras del servicio.

#### **4.4 EN 13306:3011.**

Según la norma EN 13306:3011: la moderna gestión de mantenimiento incluye todas aquellas actividades que: determinan los objetivos o prioridades del mantenimiento y las estrategias, definidas como los métodos de gestión que se utilizan para conseguir las metas u objetivos, esto con el fin de ser implementadas, planificarlas, programarlas y controlarlas desde la ejecución del mantenimiento para su realización y mejora, teniendo siempre en cuenta los aspectos económicos relevantes para la organización (Zapata, 2011).

El fin de la norma europea EN 13306 es definir los términos genéricos usados en todos los tipos de mantenimiento y en la gestión de este, independientemente del tipo de elemento que se esté considerando, con la excepción de los programas informáticos (En1306, 2011) .

Es responsabilidad de cualquier gestión del mantenimiento definir su estrategia de mantenimiento de acuerdo con tres criterios principales:

- Asegurar la disponibilidad del elemento para la función requerida, frecuentemente al coste óptimo.
- Considerar los requisitos de seguridad y salud asociados con los elementos para el usuario, personal de mantenimiento, en este punto se consideran necesario tener en cuenta cualquier impacto sobre el medio ambiente.
- Proteger la durabilidad del elemento y la calidad del producto o servicio suministrado.

La gestión de mantenimiento debe conseguir alinear y mantener todas las actividades del mantenimiento de acuerdo con la estrategia definida, esto se debe hacer de acuerdo con tres niveles de actividad en la empresa, estratégico, táctico y operativo, después de obtener el plan de mantenimiento, los gerentes encargados construyen las propias estrategias a corto y mediano plazo para atacar potencialmente los puntos débiles en el mantenimiento genérico de la empresa. El desarrollo de este plan supondrá, como punto fundamental concretar una serie de políticas a llevar a cabo para los activos que se consideren críticos.

Las acciones a nivel operativo deben asegurar que las tareas de mantenimiento se completen de forma adecuada por los técnicos seleccionados, en el tiempo acordado, siguiendo los procedimientos reseñados y utilizando las herramientas adecuadas.

## **5 Capítulo. Mantenimiento**

Desde el inicio de los tiempos, el hombre ha tenido la tendencia a desarrollar productos o equipos que fallen en la menor medida posible, los avances tecnológicos han traído consigo una gran revolución en aspectos de estudio de confiabilidad y mejoramiento operacional.

A finales del siglo XVIII e inicios del XIX, durante la revolución industrial, se inició con los primeros trabajos de reparación centrando la atención en los fallos o paros de producción y basando el mantenimiento en prácticas de prueba y corrección, esto conlleva a un cambio de percepción y de actuar ante las metodologías y tecnologías involucradas a la hora de estudiar una perturbación.

Al inicio de los tiempos se tenía un pensamiento un poco plano y sencillo ya que se esperaba a tener la certeza de presencia de una falla y esperar para actuar; hoy en día al transcurrir el tiempo se desarrollaron diferentes métodos constantes para verificar las óptimas condiciones de operación facilitando así el procedimiento a la Hora detectar y tratar las fallas. Con el tiempo dichos procesos evolucionaron junto con la incorporación de nuevas tecnologías y diferentes procesos que permiten conocer y evaluar parámetros de operación y estados de la máquina e incluso predecir un fallo y poder minimizar las afectaciones (Escobar, Villa, & Yañez, 2003).

Actualmente, el mantenimiento se concibe como parte esencial de todas las estrategias del ciclo de vida útil de un producto, para triunfar en el mercado actual, sin dejar a un lado el hecho de que este proceso es un conjunto de actividades tales como, los factores humanos que puedan influenciar como la seguridad de los funcionarios netamente implicados, factores de medio ambiente, de calidad, efectividad, competitividad, y por su puesto confiabilidad y costos implicados.

Existen diferentes técnicas de comprender el mantenimiento, las más relevantes son:

- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento predictivo

### **5.1 Mantenimiento correctivo.**

Se puede definir como el conjunto de acciones realizadas con el fin de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema (Knezevic, 1996), este tipo de mantenimiento comprende acciones urgentes realizadas sin previa planeación, demandando de

requerimientos personales, repuestos, tiempo y recursos que no fueron previstos; el mantenimiento correctivo tiene una influencia directa sobre la operación normal.

El mantenimiento correctivo contiene acciones urgentes que se realizan sin planeación previa, demandando recursos no previstos. El mantenimiento correctivo tiene actividades características de este tales como: Detección del fallo, localización del fallo, desmontaje, recuperación montaje, pruebas y verificación, estas se realizan con el fin de reducir el tiempo de paro de operación, considerando a todos los factores de seguridad, movilidad y errores relacionado con la influencia humana (Clemente Marín, 1982).

El mantenimiento correctivo, se compone de siete pasos secuenciales, localización, aislamiento, desensamblaje, intercambio, ensamblaje, alineación y verificación. Éste tiene diferentes componentes de tiempo, tales como, tiempo activo de reparación, tiempos administrativos, de logística y tiempo por retrasos.

El mantenimiento correctivo tiene ventajas y desventajas; una de sus principales ventajas es que no requiere programación ni planeación además de no necesitar del seguimiento y almacenamiento de datos; por otro lado, una gran desventaja que tiene la necesidad de tener altos niveles de inventarios produciendo pérdidas en producción y aumentando la frecuencia de fallas ocasionadas por la no detección a tiempo en la fase de desarrollo (Escobar, Villa, & Yañez, 2003).

## **5.2 Mantenimiento preventivo.**

El mantenimiento preventivo se puede definir como el cuidado y servicio prestado por el personal involucrado en mantenimiento con el objetivo de mantener los activos en óptimas condiciones de operación usando inspecciones sistemáticas y de corrección de fallas, en general antes de que ocurra la falla o evolucionen en el peor de los casos. Este tipo de mantenimiento cuenta con la mayor parte del tiempo total dedicado a mantenimiento dentro de las organizaciones.

Al llevar a cabo este tipo de mantenimiento, se logran objetivos como mejorar la vida productiva de los equipos, conservación de capital, reducción de paradas imprevistas de los equipos, reducción de pérdidas de producción, mejora en la planificación, se promueva la seguridad y salud ocupacional, la implementación y ejecución del mantenimiento preventivo debe ir alineado dentro de la eficiencia de costos (Holguín Londoño, 2017).

El mantenimiento preventivo cuenta esencialmente con seis componentes, tales como:

- Inspección: se debe revisar periódicamente todos los activos para determinar la utilidad, comparando sus características físicas con los estándares esperados según el tipo de activo.
- Servicio: este incluye, limpieza, lubricación y preservación periódica de los activos, este tiene como fin principal prevenir la ocurrencia de la falla.

- Calibración: Determinación periódica de los valores de características de un ítem en comparación con un estándar.
- Pruebas: Se realizan pruebas de verificación para determinar los niveles de degradación en cada ítem.
- Alineación y ajustes: Realizar cambios en elementos variables para lograr un óptimo desempeño de un sistema.
- Instalación: Reemplazar periódicamente un ítem con ciclos de vida degradados.

### **5.3 Mantenimiento predictivo.**

Este tipo de mantenimiento mejora en productividad, calidad en la producción y eficiencia total en la manufacturación, entregando un dominio del proceso productivo, este usa las condiciones actuales de operación de un equipo con el fin de optimizar la operación total de una planta de producción, empleando herramientas para mejorar la relación costo-beneficio y programar actividades de acuerdo con las necesidades y reduciendo costos por mantenimiento (Clemente Marín, 1982).

El mantenimiento predictivo emplea monitoreo directo de las condiciones y eficiencia de un sistema para determinar el tiempo medio para fallo, este se distingue por tener grandes ventajas sobre otro tipo de mantenimiento alguna de estas es:

- Minimizar la necesidad de grandes niveles de inventarios.
- Identificación temprana de fallas.
- Identificación de la raíz de la falla.

### **5.4 Mantenimiento productivo total.**

El mantenimiento productivo total (TPM) es un sistema japonés de mantenimiento industrial que se basa en el mantenimiento predictivo, ésta es una filosofía integrada por una serie de actividades ordenadas que ayudan a mejorar la competitividad de una organización industrial y sus servicios, el TPM genera reducción de costos, mejora tiempos de respuesta y calidad de los servicios, el TPM se puede definir como la correlación de todos los factores relevantes dentro de una organización.

Las características principales del TPM son:

- Mejorar la efectividad de los equipos
- Involucrar los operarios en el mantenimiento diario
- Mejorar la eficiencia y efectividad del mantenimiento
- Educación capacitación del personal
- Diseño y administración de equipos (evitando el mantenimiento)

## 6 Capítulo. Confiabilidad

Para analizar a fondo el concepto de confiabilidad, se debe tener en cuenta diferentes métricas que son complemento de dicha definición. El concepto de confiabilidad como probabilidad significa que cualquier intento de cuantificarlos debe involucrar métodos estadísticos. Por ende, estudiar la ingeniería de la confiabilidad es una base necesaria e imprescindible para el estudio y la evolución de dicho concepto. Por lo general, en ingeniería se tiende a garantizar 100% de confiabilidad, pero bajo la experiencia, los avances y los estudios ya realizados se ha comprobado que es una meta difícil de lograr, por tal motivo, los estudios referidos a estadísticas de probabilidad se refieren a valores muy altos o muy bajos (bajo la premisa de que ocurra una falla), el hecho de cuantificar dichos valores probabilísticos aumenta la incertidumbre de los estudios asociados ya que se necesita recurrir a la mayor información posible (O'Connor, 2015).

Cuando se habla de índices de confiabilidad, se refiere a estudios realizados a través de la probabilidad utilizando análisis estadísticos (Rodríguez Huerta, 2012). La confiabilidad se puede definir de diferentes maneras; se puede especificar con el número medio de fallas en un determinado tiempo o también como el tiempo medio entre fallas (MTBF) en el caso de que un artículo se puede reparar, o como el tiempo medio de falla (MTTF) para artículos que no se reparan.

A continuación, se describen brevemente algunas métricas usadas para medir la confiabilidad de un producto, las cuales contribuyen a la eficiencia y determinan la función y el uso que este producto puede brindar.

### 6.1 Funciones de probabilidad.

El PDF por sus siglas en inglés *Probability Density Function*, indica la distribución de fallas en todo el rango de tiempo, se denota como  $f(t)$  e indica la distribución de fallas en todo el rango de tiempo, representando la velocidad de una falla absoluta. Cuanto mayor es  $f(t)$  más fallas ocurren en un pequeño intervalo de tiempo alrededor de  $t$ .

Otra métrica de la probabilidad es el CDF conocido por sus siglas en inglés *Cumulative Distribution Function* o distribución acumulativa, se denota como  $F(t)$  y hace referencia a la probabilidad de que un producto falle en un tiempo específico  $t$ ; también se conoce como la probabilidad del fracaso.

Matemáticamente se puede describir como:

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt \quad (1)$$



La ecuación anterior es equivalente a

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2)$$

Por ejemplo, si el tiempo de falla de un producto se distribuye exponencialmente con el parámetro  $\lambda$ , la PDF es

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (3)$$

Y la cdf es:

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (4)$$

Hablando de un concepto con enfoque matemático, la confiabilidad es denominada  $R(t)$ , también se conoce como función de supervivencia, se puede interpretar como la fracción de población que sobrevive al tiempo  $t$ .  $R(t)$  es la probabilidad de éxito, esta es el complemento de  $F(t)$  y se puede escribir como:

$$R(t) = \Pr(T \geq t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (5)$$

La función de confiabilidad de la distribución exponencial es

$$R(t) = e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (6)$$

Es importante resaltar que si queremos hablar de confiabilidad va ligada sin lugar a duda con la función de riesgo o también conocida como tasa de fallo, se denota  $h(t)$ . La función de riesgo mide la tasa de cambio en la probabilidad de que un producto superviviente falle en el siguiente intervalo de tiempo, se puede describir como:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \frac{1}{R(t)} \left[ -\frac{dR(t)}{dt} \right] = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (7)$$

Reemplazando la ecuación 3 y 6 en 7, se obtiene que la tasa de riesgo de la distribución exponencial es:

$$h(t) = \lambda \quad (8)$$

La figura 3 muestra la curva de bañera clásica, esa representa los tres tipos de periodos que tiene la vida útil.

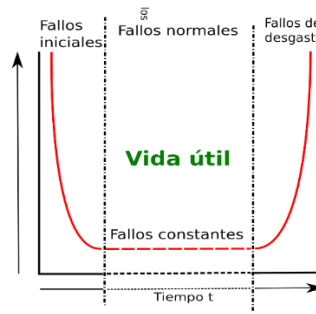


Figura 3 Curva de bañera de tasa de fallos

Las fallas tempranas o iniciales generalmente son causadas por defectos que pasaron desapercibidos, pero después de transcurrir un tiempo  $t$  se convierten en relevantes al iniciar el proceso, estos pueden ser inducidos por variaciones en la fabricación, defectos en los materiales, errores de diseño, o por el uso indebido del cliente.

En el periodo de las fallas normales, la tasa de fallos permanece aproximadamente constante, en este periodo de tiempo las fallas no siguen un patrón predecible y las fallas ocurren al azar.

En el área de desgaste la tasa de riesgos aumenta con el tiempo como resultado de los efectos irreversibles del envejecimiento, cuando un producto entra a este periodo la falla es inminente, si se desea minimizar los efectos de falla es importante recurrir al mantenimiento preventivo.

A la hora de analizar la confiabilidad se muestra otra función de suma importancia, como lo es la función acumulativa de riesgo, se denota como  $H(t)$  y matemáticamente se define como:

$$H(t) = \int_{-\infty}^t h(t)dt \quad (9)$$

Para la distribución exponencial se tiene que:

$$H(t) = \lambda t, \quad t \geq 0 \quad (10)$$

El MTTF o tiempo medio de falla es otra métrica se utiliza a la hora de medir la confiabilidad, este se puede definir como la vida útil esperada de un producto no reparable se denota como  $E(t)$ , matemáticamente se define como:

$$MTTF = E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt \quad (11)$$

Para la distribución exponencial el MTTF es

$$MTTF = E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (12)$$

La varianza es otra variable de suma importancia y denota con  $Var(T)$ , esta es una medida que se refiere a la propagación de la vida útil del producto y matemáticamente se define como:

$$Var(T) = \int_{-\infty}^{\infty} [t - E(T)]^2 f(t) dt \quad (13)$$

Para la distribución exponencial, la varianza es

$$Var(T) = \int_0^{\infty} (t - \frac{1}{\lambda})^2 \lambda e^{-\lambda t} dt = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 \quad (14)$$

Ahora se explicarán brevemente algunas funciones ligadas especialmente en el estudio de confiabilidad:

### **6.1.1 Distribución exponencial**

La distribución exponencial se caracteriza esencialmente porque la tasa de riesgo es una constante, indicando así la probabilidad de que un producto falle en el siguiente intervalo de tiempo. Ésta, es utilizada comúnmente para modelar fallas aleatorias, este tipo de fallas son causadas por factores externos.

$$f(t) = \lambda \exp^{-\lambda t}$$

### **6.1.2 Ley de Weibull**

Esta es una de las técnicas más utilizadas para analizar y concretar la probabilidad, se basa en datos medidos y asumidos; permitiendo estudiar cómo se distribuye los fallos en componentes claves, también permite observar a través del registro de fallas la variación a través del tiempo.

La siguiente ecuación describe la ley de Weibull:

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (15)$$

Donde

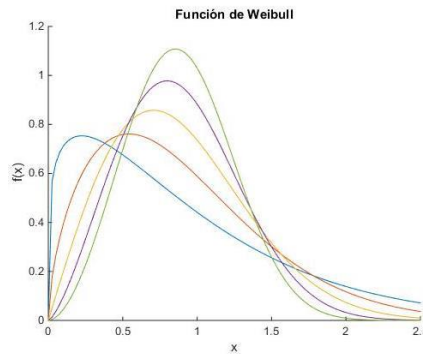
$\eta$ : Vida característica

$\beta$ : Pendiente de la recta

#### **6.1.2.1 Pasos de análisis de Weibull.**

- Agrupar los datos en orden creciente de tiempo hasta el fallo
- Obtener el rango mediano de las tablas para cada grupo de tiempo
- Parcelar en el diagrama de Weibull el rango mediano versus el tiempo de falla.

En la Figura 4, se puede observar el comportamiento de la función de Weibull



*Figura 4 Función de Weibull*

## 6.2 Análisis de la confiabilidad.

La confiabilidad se refiere al funcionamiento adecuado de equipos, entendiéndose esta como la calidad a través del tiempo, por lo tanto, un producto debe permanecer dentro de sus límites de especialización durante su vida tecnológica. La confiabilidad se puede interpretar como la probabilidad de que una unidad realice su función hasta un tiempo especificado bajo las condiciones de uso encontradas (Escobar, Villa, & Yañez, 2003).

La confiabilidad es un aspecto de incertidumbre de la ingeniería basado en un análisis probabilístico, ésta está relacionada con fallas en el dominio del tiempo, también se puede definir como el número de fallos durante un periodo (Guangbin, 2007).

A medida que pasa el tiempo, evoluciona consigo la tecnología, la administración y el mercadeo, generando revoluciones en los métodos existentes para mejorar la calidad de los productos, enfocando este cambio en la mejora de la confiabilidad.

Existe diferentes autores que se han dedicado gran parte de su vida a estudiar esta rama. La confiabilidad emergió a final de los años cuarenta, y surgió bajo la necesidad de desarrollarse para estimar el número de repuestos necesarios y mantener equipos electrónicos y mecánicos funcionando en forma intensiva por periodos largos de tiempo durante toda la guerra.

Cuando se inicia la exploración espacial alrededor de los años cincuenta, a través de satélites, sondas y vehículos tripulados, aumentó la necesidad de desarrollo e implementación de nuevos métodos que ayudaron a la evolución de la confiabilidad para los equipos y sistemas. (Escobar, Villa, & Yañez, 2003).

Otro factor que tuvo gran influencia en esta evolución fue la crisis del petróleo, a principios de los años setenta, generando cambios económicos y resaltando el inicio de liderazgo japonés en la calidad y confiabilidad de productos y servicios.

Actualmente, después de grandes avances, se vivencia una competencia intensa, un mercado globalizado y riguroso, clientes exigentes, restricciones de costos y lo más importante

expectativas de mayor calidad y confiabilidad por parte de los consumidores trayendo consigo retos por mejorar y seguir evolucionando.

La confiabilidad se refiere al funcionamiento adecuado de equipos, entendiéndose esta como la calidad a través del tiempo, por lo tanto, un producto debe permanecer dentro de sus límites de especialización durante su vida tecnológica (Knezevic, 1996). Para cumplir con las expectativas expuestas se requiere de un mejoramiento en la confiabilidad a través de los diferentes métodos.

Para concretar una definición precisa de la confiabilidad es necesario recurrir primero a 5 conceptos esenciales para ésta, los cuales se describirán a continuación:

*Estado binario:* La función de un producto es éxito o fracaso.

*Multiestado:* La función de un producto puede ser un éxito total, un éxito parcial o una falla. Cuando se habla de degradación del rendimiento se refiere a un caso especial de estado múltiple.

*Falla dura:* Esta es una falla catastrófica que causa la suspensión completa de una función. Esta se presenta en un producto de estado binario.

*Falla suave:* Es una pérdida parcial de una función. Este modo de falla ocurre en un producto de múltiples estados (degradación).

En términos técnicos, la confiabilidad se define como la probabilidad de que un producto realice su función prevista sin fallar bajo condiciones específicas durante cierto periodo de tiempo (Guangbin, 2007). La anterior definición tiene tres elementos de suma importancia, función prevista, periodo de tiempo especificado y condiciones específicas, esto indica, que la confiabilidad depende esencialmente desde la especificación de la función y de los criterios de falla.

Los avances tecnológicos y los sistemas modernos han puesto en manifiesto el hecho de aumentar los estudios en cuanto a la confiabilidad como parámetro esencial de la eficacia de un activo.

La confiabilidad tiene una característica especial de poder intercambiar otros aspectos generales de la eficacia, por lo general la confiabilidad afecta la disponibilidad y la capacidad de mantenimiento del activo, este concepto se puede definir a través de la siguiente fórmula:

$$\text{disponibilidad: } \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Donde el MTTR es el tiempo medio para reparar y el MTBF es el tiempo medio entre fallas (O'Connor, 2015).

La confiabilidad es una función que depende del tiempo, bajo la definición expuesta, el periodo de tiempo especificado puede ser la duración de la garantía, la vida útil del diseño, el tiempo de la función y otro periodo de interés. La vida de diseño de reflejar todas las

expectativas del cliente y debe ser competitiva en el mercado, según la época y las necesidades actuales.

### 6.3 Diagrama de bloques de confiabilidad.

Es una representación gráfica de la conexión lógica de los elementos de un sistema. Los elementos básicos de dichas conexiones incluyen configuraciones series y paralelo, pero también pueden existir otras configuraciones que son más complicadas, como lo son serie-paralelo (Holguín Londoño, 2017). En un diagrama de bloques de confiabilidad los componentes se simbolizan a través de bloques rectángulos y se conectan de acuerdo con la relación lógica de cada uno de estos. Dependiendo del objetivo del sistema analizado, un bloque puede representar a un componente de nivel más bajo de dicho sistema. Se caracteriza principalmente porque se trata como si fuese una caja negra donde las características físicas no son relevantes para el análisis; la función principal es analizar la confiabilidad del producto analizado y es la única entrada que se estudia.

#### 6.3.1.1 Sistemas series.

Un sistema es serie, si uno o más componentes del sistema producen fallas en todo éste, es decir todos los componentes de un sistema deben funcionar para que el sistema funcione exitosamente.

En la figura 5 se puede observar una representación de la configuración serie de un sistema con tres componentes.



Figura 5 Sistema serie

Matemáticamente se puede expresar como:

$$R \prod_{i=1}^n R_i$$

#### 6.3.1.2 Sistemas paralelos.

Un sistema es paralelo si y sólo si, la falla de todos los componentes de un sistema resulta en falla de todo el sistema, es decir, un sistema paralelo resulta exitosos si uno o más componentes están operativos (Guangbin, 2007). Este tipo de sistemas se denominan redundantes y son comúnmente utilizados en operaciones críticas donde es necesario un alto grado de confiabilidad.

La figura 6 se muestra una configuración paralela, conformada por tres elementos.

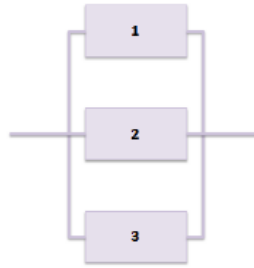


Figura 6 Sistema paralelo

Matemáticamente se puede expresar como:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

### 6.3.1.3 Sistemas mixtos.

En ocasiones las configuraciones series y paralelo se mezclan para garantizar la confiabilidad en un producto, dichos sistemas son la base para analizar configuraciones mucho más complicadas ya que se conforma de combinaciones entre ellos.

En la figura 7 se puede observar un sistema serie de paralelos.

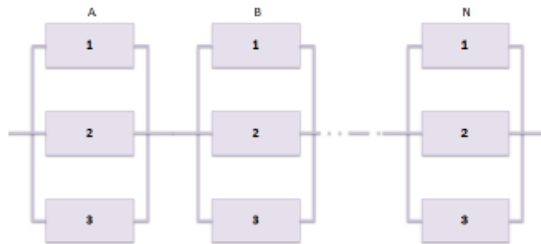


Figura 7 Sistema serie de paralelos

Los paralelos de serie se consideran como redundancia de alto nivel, en la figura 8 se puede observar dicha configuración.

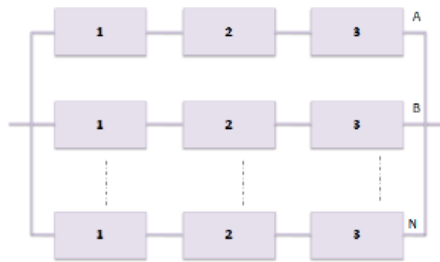


Figura 8 Sistema paralelo de series

#### 6.3.1.4 Sistemas en Standby.

También conocida como redundancia positiva, estas unidades en espera permitirán que el sistema continúe con la función cuando la unidad primaria falle. La falla del sistema ocurre solo cuando algunas o todas las unidades en espera fallan.

La figura 9 se puede observar un sistema standby.

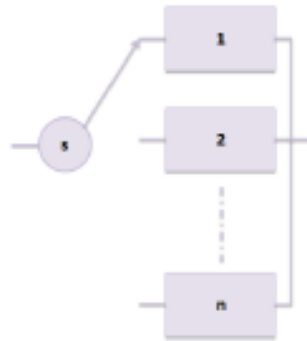


Figura 9 Sistema en standby

*Sistemas reducibles:* Se caracterizan por tener diferentes elementos que permiten realizar subsistemas de series, paralelos o standby.

*Sistemas irreducibles:* La configuración de estos sistemas tienen la característica de que no se pueden reducir de forma directa, pero existen diferentes métodos que se pueden llevar a cabo para su análisis:

- Método de la descomposición
- Métodos de caminos mínimos
- Métodos de cortes

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar un sistema irreducible.

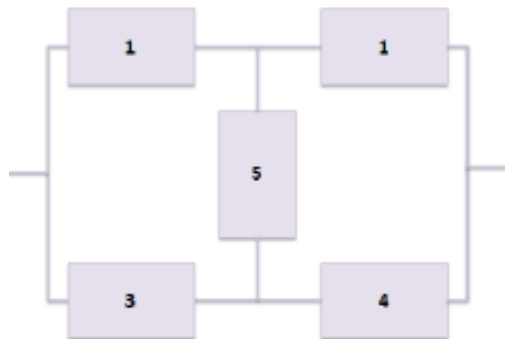


Figura 10 Sistema irreducible



### **Parte III. Análisis, resultados y conclusiones**

#### **7 Capítulo. Métodos para analizar la confiabilidad**

Alrededor de los años 90, aparece la gestión de activos generando múltiples beneficios en la mayoría de las empresas con diferentes índoles, generando una posible “invasión” de interpretaciones posibles en cuanto a la gestión de activos, pasando por las finanzas, la informática, el mantenimiento, los bienes raíces, etc. Esto trajo la necesidad de generar una norma estándar en Gestión de Activos, así y comité de expertos multi-industrias e internacional se estableció en el año 2002, generando la PAS 55 ASSET MANAGEMENT, esta tuvo una gran acogida por todas las empresas ya que prometía ser una norma con gran potencial y generó un sistema de certificación (Bernardo Durán, 2008).

En la norma europea EN 13306:2011, la definición moderna de gestión de mantenimiento incluye todas las actividades que: determinan los objetivos de mantenimiento, es decir, las metas asignadas y aceptas en la etapa de diseño, las estrategias que se determinaron bajo estándares y normativas, las responsabilidades en la gestión, esto permitirá un mejor control a la hora de implementar estrategias de planificación y control del mantenimiento y permitiendo así mejorar dicha etapa, es importante resaltar que todo este proceso se realiza bajo la concepción de reducir costos y mejorar el mantenimiento (En1306, 2011).

Según Crespo (2007), para una gestión eficaz y eficiente del mantenimiento, es necesario recurrir y analizar dos aspectos claves, la primera se refiere a seguir una serie de pasos que aseguren el curso de acción del mantenimiento, es decir, seguir el debido proceso planteado para el activo a analiza. En segundo lugar, implementar una estrategia para la debida selección del personal que este encargado del proceso. Estos dos aspectos, condicionan a la eficacia y a la eficiencia, por su parte, la eficacia expone la bondad con que un equipo consigue lograr los objetivos dispuestos en las diferentes etapas del ciclo de vida, la eficacia por su parte se mide en calidad del servicio realizado por los funcionarios, es decir la eficacia se concentra en el correcto proceso y en la reproducción de los resultados esperados (Parra Máquez & Crespo Márquez, 2012).

Existen diferentes métodos que pueden mejorar la confiabilidad en los sistemas y/o productos entre cuales están:

- Análisis de árbol de falla (FTA).
- El análisis del modo de fallo y los efectos (FMEA).
- Diseño robusto.

## 7.1 Análisis de árbol de falla.

FTA por sus siglas en inglés (*Fault Tree Analysis*), es uno de los métodos más utilizados para el análisis de confiabilidad y cuantificar los riesgos asociados con los fallos de los sistemas. El FTA utiliza el análisis de la combinación de eventos que puedan favorecer un fallo crítico en determinado sistema, permitiendo calcular la probabilidad de fallo. El FTA permite cuantificar las fallas de un sistema utilizando una aproximación de arriba hacia abajo (“top-down”) para determinar de manera sistemática las condiciones de falla de un sistema (Holgúin Londoño, 2017).

El FTA es utilizado en diferentes sectores de la industria tales como: sistema de transporte, sistema de telecomunicaciones, sistemas ferroviarios, diseño de centrales nucleares, sistemas médicos entre otros, cabe resaltar que en sistemas informáticos y de información

Este método permite realizar un análisis precedente que permite anticiparse a una posible falla antes de que esta se presente; este análisis empieza por la parte superior del árbol y aquí se encuentran los eventos no deseados, es decir, las fallas; en un nivel inferior se ubican los eventos y factores que causan las fallas mediante un diagrama lógico conformado por compuertas lógicas AND y OR, en donde las entradas de estas son los factores que desarrollan la falla. El esquema del árbol de falla se construye dependiendo de la complejidad del sistema, esta serie de relaciones va formando un árbol.

En la figura 11 se pueden observar los símbolos que se usan en este método:

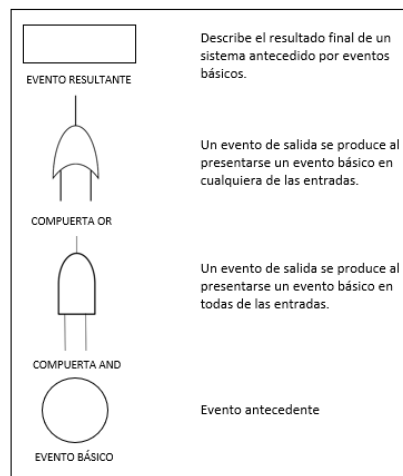


Figura 11 Símbolos lógicos básicos de un árbol de fallas.

El FTA puede ser un análisis cuantitativo o cualitativo, el primero es generalmente utilizado para investigar las causas potenciales que pueden generar el evento máximo de falla y puede describir eventos tales como, poco probable, muy probable o medianamente.

Un árbol de fallos consiste en la representación gráfica desde el suceso principal no deseado que se va a denominar TOP, analizado con todos los sucesos intermedios antes de llegar a los eventos básicos que representan el límite de resolución del árbol.

Hoy en día esta herramienta es bastante utilizada ya que es muy versátil en cuanto a la gran variedad de tareas tanto en diseño de sistemas y/o equipos de ingeniería, ya que este es un medio para identificar modos de fallos potenciales y sus principales causas.

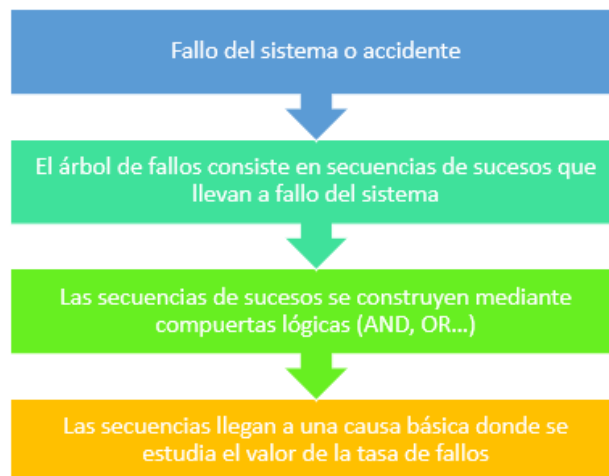
#### **7.1.1 Aplicaciones del FTA.**

- Se puede utilizar en las fases iniciales del diseño y después ser actualizado cuando se presenten diferentes modificaciones de diseño.
- Ayudar a la identificación de todas las posibles causas de fallo y la relación que pueda existir entre ellas.
- Es posible utilizarse como una herramienta en la etapa de diseño de un producto o un proceso.

#### **7.1.2 Cualidades de la técnica FTA.**

- A través de esta se pueden identificar fallos de forma deductiva
- Resalta aspectos importantes en un sistema respecto al fallo
- Es una herramienta didáctica y gráfica de gestión del sistema.
- Permite el análisis cuantitativo y cualitativo de la confiabilidad de sistemas.
- Proporciona resultados tanto cualitativos como cuantitativos en términos de probabilidad de fallos de componentes.

En la siguiente figura se muestra la estructura genérica del árbol de fallo. El suceso no deseado TOP aparece en la parte superior y se relaciona con los fallos básicos mediante puertas lógicas, este se limita a identificar los sucesos y elementos del sistema que conducen a un fallo específico.



*Figura 12 Esquema general de árbol de fallos*

### 7.1.3 Sucesos TOP.

La característica principal del FTA es que se enfoca en analizar y estudiar un evento no deseado, para esto se descompone el evento denominado suceso cumbre o “TOP”, en función de los factores que hay contribuido a que este suceda, seguido a esto se analiza la combinación de otros sucesos y condiciones que influyen para que suceda el evento TOP.

Es una técnica muy utilizada, para entenderla es debe estudiar de arriba hacia abajo, se parte del suceso “TOP” y se empiezan a desglosar las causas de estas; al mismo tiempo, cada una de sus causas se analizan de la misma forma, llegando así a las causas básicas del evento cumbre. El árbol de fallos se puede definir como un diagrama que representa de forma lógica las relaciones existentes entre un evento no deseado y las causas del mismo.

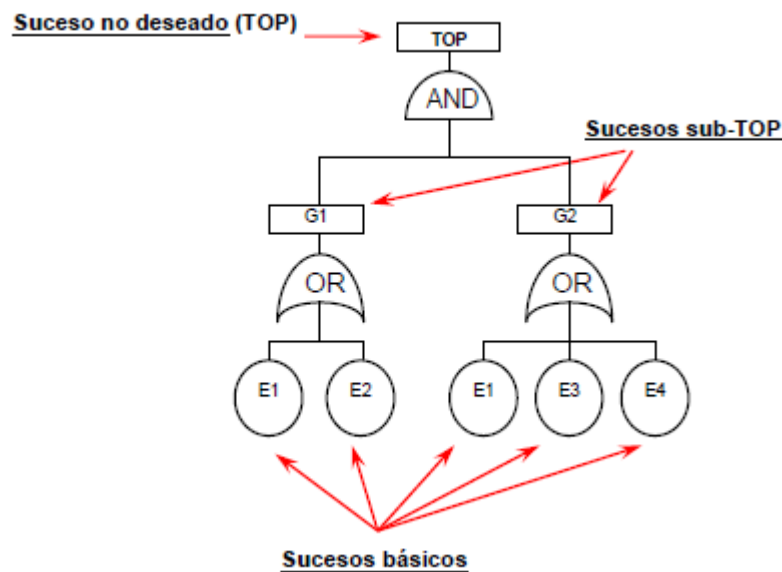


Figura 13 Árbol de fallos

#### 7.1.3.1 Etapas del FTA.

El árbol de fallos contempla diferentes etapas las cuales se describirán brevemente a continuación:

- Definición del problema y establecimiento de condiciones limitantes.
- Construcción de árbol de fallos.
- Reducción de árboles.
- Análisis cualitativo del árbol.
- Análisis cuantitativo del árbol.

### ***7.1.3.2 Definición del problema.***

La primera etapa del FTA es la definición del problema, es decir, definir el suceso cumbre y las condiciones limitantes de este, pero para definir el suceso cumbre se deben tener en cuenta los siguientes interrogantes.

- ¿Cuáles? ¿Describe los efectos colaterales de que el evento TOP se dimensione?
- ¿qué? Hace referencia a qué tipo de suceso no deseado puede ocurrir
- ¿Dónde? Indica donde puede ocurrir el suceso no deseado.
- ¿Cuándo? Describe cuando puede ocurrir el suceso no deseado.

Por otra parte, se debe condicionar el problema, es decir, se deben aclarar y postular cuáles son las limitantes del suceso TOP, tales como:

- Limitantes físicos
- Condiciones iniciales
- Condiciones externos

. Nivel de resolución: Grado de detalle en la representación del suceso no deseado y las causas que lo originan.

### ***7.1.3.3 Construcción del árbol de fallos***

Esta construcción se sustenta de tres pilares básicos

- a. Símbolos gráficos de representación
- b. Regla de construcción
- c. Álgebra lógica subyacente en el esquema del árbol.

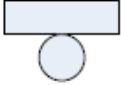
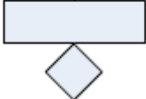
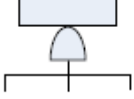
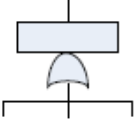


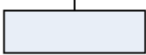
Como se ha venido mencionando, el primer nivel del árbol de fallos es el suceso TOP, en el siguiente nivel se determina las causas inmediatas para que se pueda dar el suceso TOP. Generalmente, estas causas no son básicas, sino que son fallos intermedios. El suceso TOP y las causas se conectan mediante puertas lógicas que dependen del tipo de relación establecida entre entradas y salidas.

Después cada una de las causas no básicas del fallo se desarrollan en el nivel inferior hasta alcanzar el nivel de resolución establecido como límite.

#### **Simbología:**

Se utilizan un conjunto de símbolos en la construcción del árbol de fallos, para muchos de los cuales existen más de una representación gráfica con el mismo significado. Los símbolos utilizados se pueden dividir en dos clases, denominados puertas lógicas y sucesos a continuación se pueden observar cada una de estas:

*Tabla 1 Símbolos utilizados en la construcción del FTA*

	Símbolo	Descripción
Sucesos	<p>Suceso básico</p> 	Suceso básico representa un fallo básico del equipo que no requiere posterior desarrollo
	<p>Suceso no desarrollado</p> 	El suceso no desarrollado no puede considerarse como básico pero sus causas no se desarrollan por falta de información de interés.
Puertas lógicas	<p>Puerta Y (AND)</p> 	El suceso de salida A ocurre si sólo si ocurren todos los sucesos de entrada E1, E2, E3
	<p>Puerta O (OR)</p> 	El suceso de salida A ocurre si ocurre uno o más de los sucesos de entrada E1, E2, E3
Símbolos de transferencia	<p>Transfer-out</p> 	Indica que el árbol se desarrollo en otro lugar
	<p>Transfer-in</p> 	Desarrollo del árbol para la señal de transfer-out.
Descripción del estado	<p>Rectángulo de comentario</p> 	Información adicional

Usualmente, se utilizan las siguientes puertas lógicas:

- Puerta AND: El fallo de salida se produce si ocurren al mismo tiempo todos los fallos de entrada.
- Puerta OR: El fallo de salida se produce si ocurre cualquiera de los fallos de entrada.
- Existen también otras puertas utilizadas que no son muy comunes tales como:
- Puerta OR-Exclusiva: El fallo se produce si ocurre específicamente uno de los fallos de entrada.
- Puerta Y prioritaria: El fallo de salida ocurre si y sólo si todas las entradas ocurren en una secuencia determinada.
- Puerta de inhibición: La salida ocurrirá si y sólo si, lo hace su entrada y además se satisface una condición dada.

Sucesos lógicos:

- Suceso básico
- Suceso intermedio: Resultado de la interacción de otros sucesos.
- Suceso no desarrollado: Las causas d estas no se desarrollan

#### Símbolos de transferencia:

- Transferencia de entrada: Indica que el árbol de se desarrolla en una transferencia de salida.
- Transferencia de salida: Indica la posición del árbol que se una a la correspondiente transferencia de entrada.


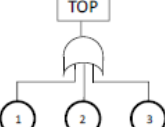
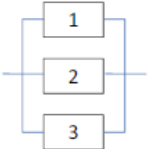
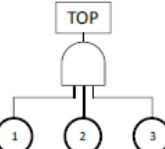
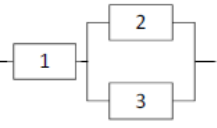
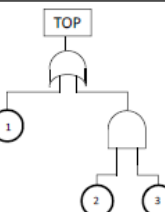
#### **7.1.3.4 Reglas de construcción de un árbol de fallos.**

Para la construcción de un árbol de fallos se basa en un método sistemático de parte del suceso TOP y se va desarrollando en sucesos más elementales.

Sin embargo, a partir de dos análisis diferentes se pueden obtener dos árboles de fallos diferentes de diferente tipología partiendo del mismo suceso TOP, puesto que al llevar a cabo todo el proceso se deja un margen amplio para la selección de sucesos intermedios.

Sin embargo, existen diferentes árboles de fallos guía que se pueden contrastar con los diagramas de bloque universales, los cuales se muestran a continuación:

*Tabla 2. Contraste entre diagrama de bloques universal y árboles de fallos*

DIAGRAMA DE BLOQUES DE FIABILIDAD	ÁRBOLES DE FALLOS
 <p>Estructura serie</p>	
 <p>Estructura paralelo</p>	
	

### Algebra lógica:

El algebra booleana está netamente relacionada con el árbol de fallos, puesto que representa de forma matemática mediante símbolos y ecuaciones las relaciones lógicas entre sucesos y causas.

El árbol de fallos es equivalente a una ecuación booleana que establece las combinaciones lógicas de ocurrencia de los eventos que influencia en el evento TOP.

$$T(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad X_i \in \{0,1\} \quad T \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}$$

### Reducción y análisis cualitativo

Como se mencionó anteriormente, pueden existir diferentes arboles de fallos partiendo del mismo evento TOP, por ende, diferentes ecuaciones booleanas, sin embargo, al reducir cada una de esas se llega a la misma utilizando las y leyes y algebra de Boole.

Se debe tener sumo cuidado al llegar a la ecuación reducida ya que puede generar diferencias entre sí, para mitigar este riesgo se utilizan diferentes métodos de reducción pasados en los conjuntos mínimos de corte o conjunto mínimo de éxito.

Se puede decir que la ecuación reducida del árbol de fallos es la base del análisis cualitativo, para llevar a cabo posteriormente el análisis cuantitativo.

A partir del análisis cualitativo, permite identificar las combinaciones simples, dobles, etc. Que conllevan al suceso cumbre, identificando el tipo de suceso.

### Análisis cuantitativo

Este análisis se basa en el cálculo de la probabilidad del suceso cumbre y en el estudio de importancias e incertidumbres basada en la probabilidad de ocurrencia de los sucesos básicos que forman el mismo.

Existen una gama muy grande de métodos que se basan en la cuantificación de árboles de fallo y la clasificación se establece basado en diferentes criterios. El método más aceptado para la evaluación de árbol de fallos cuando este incluye puertas lógicas es el tratamiento con Cadenas de Markov o bien mediante la simulación con el método de Monte Carlo.

A continuación, se presenta una tabla donde se describen las diferentes magnitudes medibles para en análisis del suceso TOP de un árbol de fallos.



Tabla 3. Magnitudes para el suceso TOP

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	REPRESENTACIÓN
Disponibilidad	Probabilidad de que el suceso TOP no exista al tiempo t	$A_s(t)$
No Disponibilidad	Probabilidad de que el suceso TOP exista al tiempo t	$Q_s(t) = 1 - A_s(t)$
Fiabilidad	Probabilidad de que el suceso TOP no ocurra en $(0, t]$	$R_s(t) \leq A_s(t)$
No Fiabilidad	Probabilidad de que el suceso TOP ocurra antes de t	$F_s(t) = 1 - R_s(t)$ $F_s(t) \geq Q_s(t)$
Densidad de Fallos	Derivada primera de la distribución de fallos $F_s(t)$	$f_s(t) = dF_s(t)/dt$
Intensidad condicional de fallos	Probabilidad de que el suceso TOP ocurra por unidad de tiempo t	$\lambda_s(t)$
Número diferencial esperado de ocurrencias del suceso TOP	Número de veces que se espera que ocurra el suceso TOP durante $(t, t+dt)$	$W_s(t, t+dt) = w_s(t)dt$
Número esperado de ocurrencias del suceso TOP	Número de veces que se espera que ocurra el suceso TOP durante $[t_1, t_2)$	$W_s(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} w_s(t)dt$
Tiempo Medio al Primer Fallo	Tiempo esperado que transcurrirá hasta la primera ocurrencia del suceso TOP	$MTTF_s = \int_0^{\infty} f_s(t)dt$

### Clasificación de los métodos de análisis cuantitativo:

- Esta primera etapa se constituye por métodos que hacen uso de Primeros Implicantes (PIs), estos representan las combinaciones mínimas de sucesos básicos que causaron la aparición del suceso TOP, seguidamente se desarrolla la evaluación cuantitativa a través de cálculos probabilísticos.
- Esta segunda tendencia se encuentra integrada por métodos de evaluación directa a partir de la función de Estructura.
- La tercera etapa evalúa el árbol de fallos tras una transformación previa a Diagrama de Decisión Binaria seguida de la utilización de productos implícitos.

### **7.2 Análisis del modo de fallo y efectos FMEA.**

El análisis del modo de fallo y los efectos, FMEA por sus siglas en inglés (*Failure Mode Effect Analysis*) es una herramienta proactiva utilizada para descubrir y corregir las deficiencias de diseño a través del análisis de posibles modos de falla, efectos y mecanismos,

seguido de una recomendación de acción correctiva. El FMEA consiste en una serie de pasos, destinados a reconocer y evaluar el posible fallo de un producto, identificando acciones que reduzcan la probabilidad de ocurrencia de falla potencial en el sistema. El FMEA tiene numerosos beneficios puesto que son valiosos para diseñar la manera de determinación y priorización del área de acción (Jianwen, Ye, Vicario, Kumiko , & Fumio , 2015).

El método FMEA es un análisis de tipo inductivo, éste tiene en cuenta las fallas presentadas por los componentes ubicados en el nivel inferior de todo el sistema, paso a seguir es escalar en orden jerárquico cada uno de los estados, este método tiene tres cualidades en particular como lo son, detectabilidad encargada de estudiar la probabilidad de encontrar fallas,; severidad es el grado de importancia de la falla presentada, por último está la frecuencia quién es entendida como la cantidad de veces que se presenta la falla (O'Connor, 2015).

Este método es bastante riguroso ya que se debe tener definido claramente el sistema mediante gráficas de los procesos, documentación, codificación clara y concisa del proceso que se va a llevar a cabo, sin dejar pasar por alto ningún detalle (Holguín Londoño, 2017).

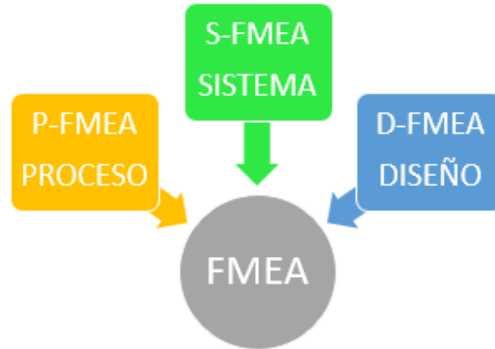
El FMEA puede clasificarse en tres categorías según el nivel de análisis: FMEA del sistema, FMEA de diseño y FMEA del proceso. Hay algunos otros tipos de FMEA, que pueden considerarse como extensiones de estos tres tipos. Por ejemplo, los FMEA de software y maquinaria pueden considerarse casos especiales de diseño FMEA, este método se utiliza en varias industrias, siendo esta estandarizada (O'Connor, 2015).

La metodología que se requiere se describe a continuación:

- Identificar y marcar los componentes del sistema.
- Describir las funciones que presenta cada componente.
- Tener en cuenta cualquier tipo de falla que se pueda presentar, sin importar que sea mínima la probabilidad de presentarse.
- Analizar los efectos o repercusiones que puedan llegar a presentarse ante la falla de cualquier elemento del sistema, es decir, analizar la severidad.
- Registrar detalladamente todas las causas y/o factores que hace un componente del sistema presente una falla.
- Calcular el número de prioridad, este es el producto de los índices de ocurrencia, severidad y probabilidad de no detección de la falla, este debe ser calculado para todas las causas de falla que se puedan presentar.
- Descripción de las posibles soluciones si se presenta una falla. Dentro de esta descripción se debe aclarar los responsables de estas acciones a ejecutar, como también los plazos máximos para concluir las mismas.
- Recalcular los índices teniendo presente las modificaciones que se presenten con presencia de fallas, verificando que estén dentro de los valores deseados.

Es importante recalcar que FMEA recomienda acciones preventivas que se toman para reducir las fallas de un sistema, sin embargo, los riesgos asociados por fallas operativas humanas o debidas a acciones del medio ambiente, no se pueden relacionar con este método (Holguín Londoño, 2017).

El método FMEA es un complemento del FTA.



*Figura 14 Tipos de análisis del modo de fallo y efectos.*

En la figura anterior se pueden observar los tres tipos de Análisis del modo de fallo y efectos los cuales se describirán brevemente a continuación:

FMEA de sistema: Asegura la compatibilidad de los componentes del sistema.

FMEA de diseño: Reduce los riesgos por errores en el diseño.

FMEA de proceso: revisa los procesos para encontrar posibles fuentes de error.

### **7.3 Análisis de relevancia e importancia.**

Un componente es relevante si su estado de falla o no afecta en general al sistema, a grandes rasgos este es un concepto cualitativo. Es común pensar que todos los elementos de un sistema son relevantes para descartar casos comunes, para esto es necesario estudiar la relevancia de una manera dinámica y cuantitativa en lugar de la definición común cualitativa y estática en un estado del sistema inicial

Actualmente, pocos autores se han enfocado en estudiar la relación entre la relevancia y la importancia, puede ser porque normalmente se supone que los componentes son relevantes para descartar casos comunes enfocadas en la confiabilidad (Guangbin, 2007).

## **7.4 Diseño robusto.**

Cuando hablamos de diseño robusto hablamos del hecho de crear diseños en donde las posibles fallas de forma predecible, al implementar unas las metodologías para diseño robusto se buscan que el resultado sea raceo a los factores de ruido, adicionalmente que sea innovador.

El diseño robusto también es conocido como método Taguchi, se desarrolló por Genichi Tauguchi, este considera los factores de ruido (variación ambiental durante la vida útil del activo, variación debido al uso y manipulación, deterioro y desgaste...), esta metodología se enfoca en mejorar la función principal y fundamental del producto, por ende, hace que el diseño sea flexible y su ingeniería sea concurrente.

Para logar un diseño robusto contundente, es necesario realizar estudios de parámetros del producto que pueden llegar a ser criticos en el desempeño del activo y puedan minimizar la variabilidad de este (Martínez Camacho, 2004).

Últimamente, las empresas líderes en comercio vienen invirtiendo en este tipo de metodologías que peritan reducir los niveles de falla en las operaciones, por consiguiente, se ve un gran impacto y la estructura de costos y utilidades de la empresa.

### ***7.4.1.1 Estrategia de robustez:***

La reducción en la variación es reconocida como una clave esencial de la confiabilidad y el mejoramiento de la productividad.

En el momento que se logra dicha reducción se puede prevenir fallas en las etapas subsecuentes, esta estrategia trata prevenir y disminuir fallas a través de la optimización del producto y el diseño del todo el proceso, ésta provee la metodología para llegar sistemáticamente a una solución que fomente que el diseño sea menos sensible a variaciones usando las siguientes herramientas primarias: Diagramas P, función ideal, función de pérdidas cuadráticas, relación señal/ruido y DOE.

Hoy en día existen diferentes enfoques para estudiar las perturbaciones y a partir de esto llevar a cabo estrategias para mejorar la calidad de productos y procesos. Uno de estos es el diseño robusto, creado por Taguchi; cuyo objetivo principal es hacer que un proceso sea insensible a los factores de ruido. Para lograr esto es esencial identificar factor de control y de ruido que estén involucrados en el proceso que se está estudiando. Luego, el diseño robusto de parámetros procura hacer los procesos insensibles al ruido a través de la elección apropiada de niveles para los factores de control.

Una de las herramientas más importantes para muchos autores es el diseño de parámetros, puesto que se asocia a mejorar la calidad y se caracteriza por no incrementar los costos al elegir los niveles adecuados de los factores de control (Petrica, Barbu, & Axinte, 2017).

El diseño robusto es una herramienta creada por Genichi Taguchi, éste implica diseñar un producto que sobrepase las expectativas del cliente en cuanto a las características más importantes y relevantes que permitan ahorrar dinero, es decir, descartar características que el cliente no tiene como prioridad para su producto, reduciendo así los costos que esta implica.

Taguchi en todas sus investigaciones afirma que es más económico trabajar en un rediseño del producto que invertir en el mantenimiento y control de calidad de los mimos, ya que trabajar en un buen diseño mejora los estándares de confiabilidad y calidad del activo. Cuando se implemente ingeniería robusta en un activo, se minimizan la probabilidad de fallo, se busca que tenga mínima variación en cuanto a las características de un activo.

La implementación de diseños robustos permite la obtención de productos de elevada calidad y bajo coste, es importante recalcar que esta técnica se puede implementar combinando las técnicas clásicas y ortodoxas para mejorar la confiabilidad del activo (Universidad de Granada)

El diseño robusto propuesto por Taguchi supone una gran revolución en cuanto a los sistemas de calidad tradicionales donde predomina el uso de herramientas para el control ON LINE, este se enfoca en aspectos como la infraestructura de calidad que sean menos sensibles a factores de ruido. La implementación de este método asegura la reducción de variabilidad sobre las características de calidad.

La filosofía de Taguchi se puede resumir principalmente en siete pasos:

1. Estudiar el impacto en la sociedad que puede ocasionar la pérdida total del producto.
2. Para entrar y permanecer en el mercado actual, es importante la mejora continua de la calidad reduciendo también los costos, se designa tres tipos de costos:
  - Costos asociados al diseño del producto
  - Costos de manufacturación
  - Costos de operación
3. Mejorar continuamente la calidad incluye una reducción constante de la variación de las características de la calidad en torno a valores nominales.
4. La pérdida ocasionada por la variabilidad en el proceso de fabricación del producto es proporcional al cuadrado de la desviación típica de la característica de la calidad estudiada respecto al valor nominal.

5. La etapa de diseño y el proceso son factores que afectan en gran medida la calidad y el coste final del activo.

6. La variabilidad del proceso y del producto se puede reducir mediante el efecto no lineal de los parámetros del producto y del proceso sobre las características de la calidad.

7. Los diseños de experimentos estadísticos pueden ser utilizados para identificar el conjunto de parámetros del producto y del proceso que reducen la variación y, por tanto, mejoran la calidad, la productividad, la fiabilidad del proceso de manufacturación y sus resultados.

En la metodología propuesta por Taguchi hay dos aspectos de suma importancia tales como calidad *Off line* y calidad *On line*, convencionalmente son conocidos como la calidad del diseño y la calidad de conformidad.

La calidad *Off line* está relacionada con los siguientes puntos:

- Identificación, estudio y análisis de las necesidades y expectativas del cliente.
- Diseño del producto que cubra todas las necesidades del cliente.
- Diseño de un activo que tenga un proceso de manufacturación consistente y económico.
- Desarrollo de especificaciones, procedimientos y equipos de manufacturación acordes con el activo diseñado.
- Por su parte, la calidad *On line*, consta de dos etapas:
- Diseño del producto.
- Diseño del proceso.

En el diseño del producto se busca un nuevo activo o un activo modificado que cubra con todas las expectativas y necesidades del cliente y haga sencillo el proceso de manufacturación. En la segunda etapa, diseño del proceso se crean elementos necesarios para todo el proceso de manufacturación que permita que la etapa uno sea cumplida a cabalidad.

El diseño robusto se distingue por tener tres etapas de calidad *Off line*

- Diseño del sistema
- Diseño de parámetros
- Diseño de tolerancia

En cuanto a la calidad *On line* establece dos etapas:

- Métodos de control de la calidad de producción: los cuales incluye, proceso de diagnóstico y ajuste, predicción y corrección, medición y acción.
- Relaciones con el cliente.

#### ***7.4.1.2 Calidad Off line.***

En la primera etapa, es decir el diseño del producto se considera la problemática del diseño del sistema, se aplican conocimientos científicos para desarrollar un prototipo de diseño que cumpla con todos los requerimientos del cliente. Es importante la selección inicial de materiales y la tecnología para el debido proceso de manufacturación, el principal objetivo de esta etapa es conseguir la mejor tecnología que se encuentre en el mercado actual para satisfacer al cliente al mínimo costo.

La siguiente etapa es el diseño de parámetros, en esta se determina el conjunto óptimo de todos los parámetros del producto, el objetivo principal es minimizar los costos de manufacturación y del ciclo de vida del producto, esto se logra a través de la implementación de la ingeniería robusta ya que, con este tipo de diseño se disminuyen los factores de ruido, al hablar de factores de ruido se refiere a una fuente de variación incontrolable en las características funcionales del producto. Por último en el diseño de las tolerancias, se establecen los límites en cuanto a los valores nominales, se especifican unas tolerancias amplias y suficientes para minimizar los costos.

En la segunda etapa, es decir, el diseño de proceso se debe considerar de forma paralela a la etapa descrita anteriormente del diseño del sistema, esta consiste en la selección del proceso de manufactura sobre la base del conocimiento del producto y de la tecnología, especificando la maquinaria existente y usada.

Finalmente, en el diseño de las tolerancias se establecen las tolerancias para los parámetros específicos del proceso que se han identificado como elementos influenciados durante el diseño de parámetros.

#### ***7.4.1.3 Calidad On line:***

-Diagnóstico y ajuste del proceso: el proceso es debidamente examinado en intervalos regulares de tiempo, ajustes y correcciones según las necesidades que vayan surgiendo.

-Predicción y corrección: Un parámetro cuantitativo o numérico del proceso este se mide los intervalos regulares de tiempo, estos datos se usan para proyectar tendencias en el proceso.

-Medición y acción: Consiste en el control de la calidad a través de la inspección, las unidades son reparadas o eliminadas.

### ***7.5 Métodos de Taguchi.***

#### ***7.5.1.1 Función de pérdida***

Tiene como objetivo principal evaluar cuantitativamente la pérdida de calidad, reduciendo la variabilidad del proceso y conseguir que las características de calidad se encuentren lo

más cerca a los valores umbrales. Esta herramienta sirve para evaluar de forma numérica la pérdida de calidad en un activo.

En la figura FP se observa la función de pérdida, Taguchi descubrió que la representación cuadrática de la función de pérdida es una forma eficiente y efectiva que establece la desviación de la calidad, la función de pérdida se representa matemáticamente así:

$$L(x) = K(x - m)^2$$

Donde:

$L(x)$  = Función de pérdida

$K$  = Constante

$x$  = Valor nominal o deail

$m$  = valor observado

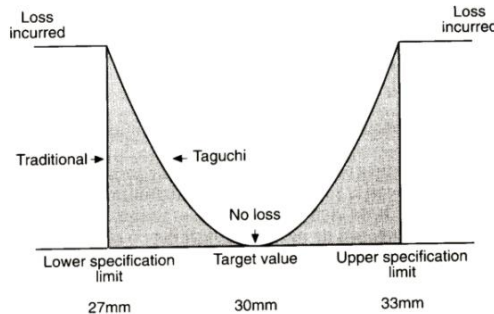


Figura 15 Función de pérdida de la calidad

El objetivo principal del uso de las metodologías de Taguchi es poder diseñar y fabricar productos en poco tiempo con alta calidad, evitando dar uso al método experimental de prueba y error, ya que este incurre costos más altos e inversión de más tiempo, para cumplir a cabalidad estos objetivos se usa la ingeniería de calidad y la estadística.

Si se analiza la función de pérdida y se obtiene que el valor de  $L$  es cero, traduce a que la calidad obtenida es la deseada, caso contrario si se obtiene un valor diferente de cero significa que se está alejando del objetivo planteado.

## 8 Capítulo. ¿Cómo se puede mejorar la confiabilidad?

El aumento de la competencia global ha ejercido una gran presión para entregar productos con mejores características, mayor confiabilidad y menor costo en un tiempo estimado más

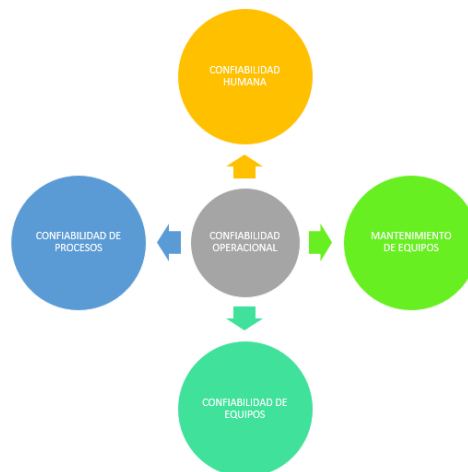


bajo, por ello muchos la mayoría de las empresas optan por invertir en análisis y estudios para la mejora continua de la confiabilidad de los activos, llevando consigo beneficios fructíferos para asegurar una competencia optima en el mercado.

Al acudir a dichas estrategias es importante tener claro los diferentes conceptos que estén asociados a este.

Después de la introducción a la confiabilidad y los diferentes métodos asociados a la mejora continua de esta, se presenta un plan paso a paso de cuáles son los métodos más apropiados para mejorar la confiabilidad, es decir, disminuir la cantidad de fallas que puedan generar interrupciones no generadas en los sistemas, es importante aclarar que la confiabilidad de un sistema es menor a la confiabilidad de cualquier equipo (Altmann, El análisis de Causa Raiz, como herramienta en la mejora de la confiabilidad, 2006).

Para el estudio de la mejora de la confiabilidad es importante estudiar a fondo la confiabilidad operacional, a continuación, se muestra un breve esquema este.



*Figura 16 Confiabilidad operacional*

Se sugiere seguir una serie de pasos que puede acelerar el mejoramiento continuo de la confiabilidad, a continuación, se describirá brevemente el proceso.

El primer paso es realizar un análisis de criticidad:

- Elaborar una matriz de criticidades
- Conceptualizar la disponibilidad y confiabilidad requerida para cada sistema y para cada equipo.
- Estudiar y analizar el impacto de una falla en cuanto a la seguridad laboral y la huella ambiental que esta pueda causar.

- Hacer un seguimiento al impacto operacional, es decir, las pérdidas económicas, multas, horas hombre, consumo eléctrico y materia prima que posiblemente se pierda al ocurrir dicha falla.

Para esto se debe tener en cuenta el concepto ya estudiado en el segundo capítulo del tiempo medio para reparar y con este el costo de reparación de este.

El paso por seguir es analizar las condiciones actuales en las que se desarrolla la operación tales como:

- Régimen operativo: cantidad de horas de operación.
- Condiciones operativas.
- Capacidad máxima de producción de cada uno de los equipos.
- Disponibilidad del sistema
- Confiabilidad del sistema.
- Tiempo medio entre fallas.

Por último, se debe analizar y evaluar la revisión del plan de mantenimiento.

Es importante aclarar que cada equipo es un mundo diferente requiere el análisis y estudio según las características

- Análisis de modos y fallas y sus efectos (FMEA)
- Árbol de fallas.
- Análisis de relevancia
- Estudios de ventanas de tiempo disponible de acuerdo con la planifican de las operaciones para realizar las intervenciones de mantenimiento de cada equipo.
- Análisis de causa raíz (RCA).
- Diseño Robusto

### **8.1 Ejemplo de cómo mejorar la confiabilidad.**

Después de visualizar a grandes rangos los conceptos de confiabilidad, FTA, FMEA, a continuación, se presentará un pequeño ejemplo aplicativo en donde se pueden observar los diferentes pasos que se sugirieron en el capítulo anterior

El ejemplo que se presenta es un equipo de barrido mecánico con sistema diesel-hidraulico al operar se evidencia carencias en la confiabilidad y presenta las siguientes características:

- Fallas repetitivas
- Bajo rendimiento
- Mala operación

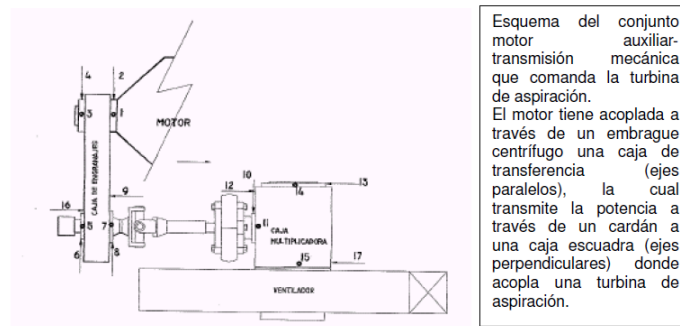


Figura 17 Esquema de accionamiento de turbina de aspiración

Para elaborar la matriz de criticidad nos vamos a basar en la siguiente figura, donde se observa una matriz de criticidad sencilla, en el eje vertical se observa la consecuencia y en el eje horizontal la frecuencia, la matriz tiene un código de colores en la cual se puede observar el nivel de criticidad del equipo.



Figura 18 Matriz de criticidad.

$$\text{Criticidad} = \text{Consecuencia} \times \text{Frecuencia}$$

Para saber y analizar el tiempo promedio entre fallas, es necesario recurrir a bases de datos genéricos ya que no se cuenta con dicha información exacta, (Romero Carranza, 2013).

Tabla 4 Análisis de riesgos.

Problema	Raíz física	Raíz humana	Raíz latentes	Causa Raíz	Soluciones
Falla en embrague centrifugo	Fractura de perno	No	No	Falla diseño	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mejora de diseño de pernos</li> </ul>
Desgaste acelerado en turbina	Abrasión	Mala operación	No	Incumplimiento de procedimientos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisión de procedimientos.</li> <li>Capacitación del operador.</li> </ul>
Desgaste acelerador en interior de tolva	Recubrimiento inadecuado	Incumplimiento de procedimientos	Falta de información por parte del fabricante	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falla de diseño</li> <li>Incumplimiento de procedimientos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisión de procedimientos.</li> <li>Capacitación del operador.</li> <li>Aplicación y Mantenimiento de recubrimiento adecuado</li> </ul>
Falla de caja de transferencia	Sobrecarga de rodamientos. Desalineación entre el volante y el embrague	No	No	Falla diseño	Luego de reiterados reclamos, la fabrica envía Técnico en garantía que modifica el centrado del volante con el embrague y sustituye caja completa
Falla en arranque de motor auxiliar	Sobrecarga	El chofer se queda sin combustible, y continúa exigiendo al arranque	Tanque auxiliar con escasa capacidad para la operación diaria	Incumplimiento de procedimientos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisión de procedimientos.</li> <li>Capacitación del operador</li> </ul>

En la siguiente figura se puede observar el árbol de una falla que se registró en el embrague centrifugo, este acopla la causa de transferencia con el motor Diesel, en dicho esquema se observa que la falla primaria es la rotura del perno de la zapata ocasionando la ruptura de la zapata, siendo esta la falla secundaria, se puede concluir que la falla fue causada por un uso inadecuado en el perno, esta es la causa física.

La causa raíz es una falla de diseño en el perno, se encontró que la solución más óptima y que mejora esta falla y previene otras es la reparación de la zapata y fabricación de pernos adecuados según el diseño adecuado.

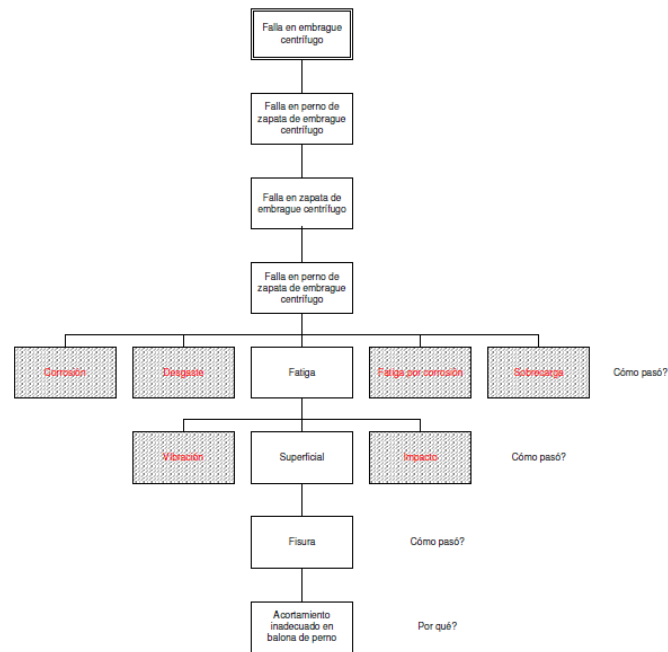


Figura 19 Árbol de fallo (falla en el embrague centrífugo)

Adicionalmente, se observa desgaste en la tolva causando un deterioro acelerado en el interior del equipo.

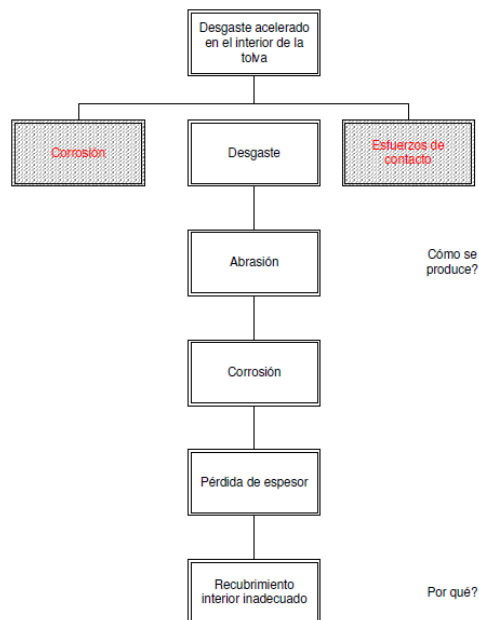


Figura 20 Árbol de falla (Desgaste tolva)

A continuación se muestra las gráficas de disponibilidad y el tiempo medio entre fallas observadas durante el análisis.

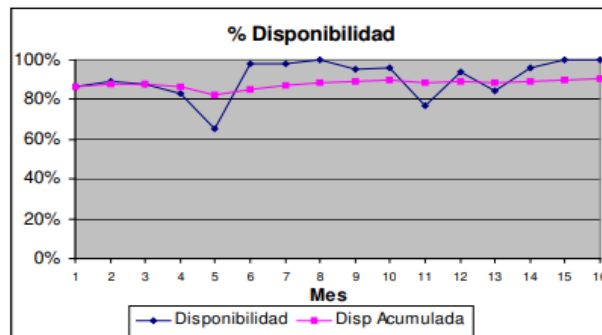


Figura 21 Disponibilidad.

En la figura 22 se puede observar que el tiempo medio entre fallas se incrementó en los últimos meses puesto que ya la pieza tenía desgastes adicionales y ya estaba más propensa a una falla.

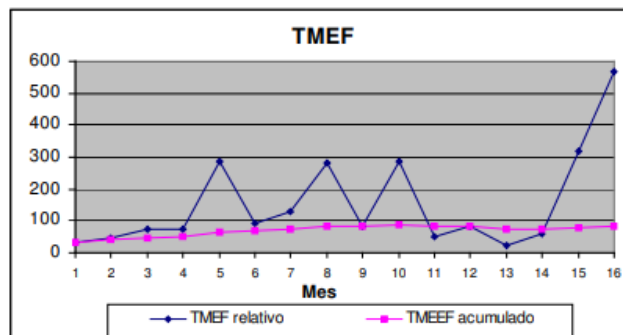


Figura 22 Tiempo medio entre fallas.

Se puede observar que la raíz física del problema planteado es una falla de diseño y de calidad por parte del fabricante ya que el recubrimiento utilizado al interior de la tolva no contenía las características necesarias que fuesen resistentes a la abrasión, adicionalmente Altmann afirma que existe una falla en la calidad de la aplicación de la pintura, así como la previa preparación de la superficie que iba ser utilizada.

La solución que se plantea es la siguiente:

- Realizar una buena selección de recubriendo que sea resistente a la abrasión, preparando de manera adecuada la superficie y realizando un buen recubrimiento con el espesor adecuado.
- Capacitación a operarios a cargo.

La implementación de estas soluciones garantiza un ciclo de vida óptimo y la extensión de este (Altmann, 2006).

## 8.2 Conclusiones

- Las estepas de diseño y planificación son de suma importancia a la hora de implementar mejoras en la confiabilidad de los sistemas, puesto que estos suman relevancia en la aplicación y desarrollo de todo el sistema.
- La mejora continua de la confiabilidad en los equipos trae consigo infinidad de beneficios ya que aumentan las posibilidades de la participación optima en el mercado y adicionalmente brinda seguridad en el personal.
- Para mejorar la confiabilidad en los sistemas es necesario combinar los métodos de FTA, FMEA y RCA, asegurando así un diseño robusto que cumpla con las expectativas del cliente y del mercado en general.
- Si se quiere llevar a cabo una buena mejora de la confiabilidad, se debe identificar y analizar una situación particular, planificar las acciones necesarias que puedan influir en esta, plantear objetivos y realizar las acciones necesarias para corregir o prevenir las fallas.
- El diagnóstico temprano de fallas trae grandes beneficios tanto económicos como operacionales para la empresa.

### Bibliografía

- Altmann, C. (2006). El análisis de Causa Raíz, como herramienta en la mejora de la confiabilidad. *Lograr Confiabilidad un Objetivo alcanzable* (pág. 15). Uruguay: Congreso Uruguayo de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad.
- Altmann, C. (2018). Obtenido de La efectividad de las actividades del mantenimiento: [https://jable.ulpgc.es/jable/cgi-bin/Pandora.exe?fn=commandselect;query=id:0009217009;command=show\\_pdf](https://jable.ulpgc.es/jable/cgi-bin/Pandora.exe?fn=commandselect;query=id:0009217009;command=show_pdf)
- Bernardo Durán, J. (2008). *Gestión de mantenimiento bajo estándares internacionales como PAS 55 Asset Management*.
- Cañaveral Vargas, C., & Heredia, D. M. (2017). *Desarrollo de una metodología para correlacionar técnicas de análisis en confiabilidad con los ciclos de vida y la gestión de activos*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Clemente Marín, G. (1982). *upcommons.upc.edu*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/4393>
- En1306. (2011). *Norma Europe EN 1306*. España : Norma Europea.
- Escobar, L. A., Villa, E. R., & Yañez, S. (2003). CONFIABILIDAD: HISTORIA, ESTADO DEL ARTE Y DESAFIOS. *Dyna*.
- Guangbin, Y. (2007). *Life Cycle Reliability Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Gutiérrez, B. (s.f.). *infopl.net*. Obtenido de [http://www.infopl.net/files/documentacion/seguridad\\_normativa/infoPLC\\_net\\_Seguridad\\_Maquina\\_SEiS\\_Maquinaria.pdf](http://www.infopl.net/files/documentacion/seguridad_normativa/infoPLC_net_Seguridad_Maquina_SEiS_Maquinaria.pdf)
- Holguín Londoño, M. (2017). *sites.google.com/*. Obtenido de <https://sites.google.com/a/utp.edu.co/mauricioholguin/>
- IEC. (2004). *Norma IEC\_60300-3*.
- Jianwen, X., Ye, L., Vicario, E., Kumiko , T., & Fumio , M. (2015). *ieeexplore.ieee.org*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7434484/>
- Knezevic, J. (1996). *Mantenimiento*. Madrid: Isdefe.
- Martínez Camacho, J. J. (2004). *Integrando Diseño Robusto, Diseño Axiomático y Triz como una estrategia para el diseño de seis sigma*. Monterrey: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.



- O'Connor, P. .. (2015). *Practical Reliability Engineering*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Parra Máquez, C. A., & Crespo Márquez, A. (2012). *Ingeniería de Mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos*. Sevilla: Ingema.
- Perez Gelvez, A., & Carrasquilla Franco, E. (2013). *COSTEO DEL CICLO DE VIDA DE UN ACTIVO*: . Medellín: Universidad EAFIT.
- Petrica, G., Barbu, I. D., & Axinte, S. D. (2017). Reliability analysis of a Web server by FTA method. *IEEE*.
- Rayo Peinado, J. (2011). La norma PAS%%. *Preditec*.
- Rodríguez Huerta, F. (2012). *Diseños Robustos en Sistemas de Control*. Guanajato: Centro de Investigación en Matemáticas.
- Rodríguez, F. M. (2012). *Diseño Robusto en Sistemas de Control*. Guanajuato: Cimat.
- Romero Carranza, J. L. (2013). *Análisis de criticidad y estudio RCM del equipo de máxima criticidad de una planta desmontadora de algodón*. Sevilla: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA.
- Schneider electric. (s.f.). *www.schneider-electric.com.pe*. Obtenido de <https://www.schneider-electric.com.pe/es/work/services/energy-and-sustainability/metering-power-reliability-and-microgrids/quality/overview.jsp>
- Universidad de Granada. (s.f.). *ugr.es*. Obtenido de [http://www.ugr.es/~mruiz/temas/Tema\\_9.pdf](http://www.ugr.es/~mruiz/temas/Tema_9.pdf)
- Yuin, W., & Alan, W. (1997). *Diseño robusto utilizando los métodos Taguchi*. Madrid: Diaz de Santos.
- Zapata, C. J. (2011). *Confiabilidad de sistemas eléctricos de potencia*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.